

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

STUDIE VLIVU PROCESNÍCH PARAMETRŮ PŘI DOPŘEDNÉM PROTlačOVÁNÍ NA NAMÁHÁNÍ PRŮTLAČNICE

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS IN FORWARD EXTRUSION ON THE DIE LOADING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JANA POKORNÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JINDŘICH PETRUŠKA, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jana Pokorná

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Studie vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na namáhání
průtlačnice**

v anglickém jazyce:

Influence of process parameters in forward extrusion on the die loading

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pomocí výpočtového modelování (velké deformace, plasticita, kontakt) stanovte vliv základních procesních parametrů (tření, velikosti redukce, redukčního úhlu, materiálu) na namáhání průtlačnice při dopředném protlačování za studena. Uvažujte složenou konstrukci průtlačnice s předepjatou vnitřní částí.

Cíle diplomové práce:

Stanovení závislosti mezi mechanickým namáháním kritických částí pracovního povrchu průtlačnice a geometrickými a materiálovými charakteristikami procesu protlačování.

Seznam odborné literatury:

Janiček, P., Ondráček, E.: Mechanika těles – Pružnost a pevnost I, II, Skripta VUT v Brně, CERM, 2004, 2006

Elfmark J., a kol.: Tváření kovů, SNTL Praha, 1992

Pešina, E.: Základy užité teorie plasticity, SNTL Praha, 1966

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 18.11.2008

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Jedním z rozhodujících faktorů efektivního využití technologie dopředného protlačování je životnost tvářecích nástrojů. Velmi namáhaným tvářecím nástrojem je průtlačnice, jejíž vhodnou konstrukcí lze významně ovlivnit kvalitu průtlačků i namáhání průtlačnice a s ním související životnost.

Metoda konečných prvků umožňuje tento proces simulovat a určit sílu potřebnou k protlačení polotovaru a stav napjatosti průtlačnice i průtlačku. V této práci byla výpočtová simulace provedena v programu ANSYS 11.0 a byl stanoven vliv redukce, úhlu redukčního kuželu, délky průtlačku, zaoblení přechodových částí průtlačnice, materiálu polotovaru a tření na protlačovací sílu, namáhání průtlačnice a vznik trhlin v průtlačku. Výsledky lze využít k optimalizaci konstrukce průtlačnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dopředné protlačování, výpočtová simulace, namáhání průtlačnice

ABSTRACT

One of the decisive factors of effective using of forward extrusion technology is lifetime of forming tools. Die is very loaded forming tool which loading and therewith related lifetime can be significantly affected by its construction. Construction also affected quality of extruded material.

Finite element method allows to simulate this process and assess force which is needed to extrusion and state of stress in die and extruded material. Numerical simulation was realized in program ANSYS 11.0. Influence of reduction, angle of reduction, length of extruded material, rounding transition of die parts, extruded material and friction coefficient on die loading and emergence of cracks in extruded material was set in this diploma thesis. Results can be used to die construction optimization.

KEY WORDS

Forward extrusion, numerical simulation, die loading

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POKORNÁ, J. *Studie vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na namáhání průtlačnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 53 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Jindřicha Petrušky, CSc. s využitím uvedené literatury.

29.5.2009

.....
Jana Pokorná

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat prof. Ing. Jindřichu Petruškovi, CSc. za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1 ÚVOD | 11 |
| 2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ | 12 |
| 2.1 FORMULACE PROBLÉMU | 12 |
| 2.2 CÍL PRÁCE | 12 |
| 3 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN | 13 |
| 4 PRŮTLAČNICE | 14 |
| 4.1 KONSTRUKCE PRŮTLAČNICE | 14 |
| 4.2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU PRŮTLAČNIC | 17 |
| 4.3 NAMÁHÁNÍ PRŮTLAČNIC A JEJICH ŽIVOTNOST | 17 |
| 5 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU | 19 |
| 5.1 KONEČNOPRVKOVÁ SÍŤ | 20 |
| 5.2 MODEL Y MATERIÁLŮ | 21 |
| 6 GEOMETRICKÉ A MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY MAJÍCÍ VLIV NA PROCES PROTlačOVÁNÍ | 23 |
| 6.1 REDUKCE | 23 |
| 6.2 DÉLKA POLOTOVARU | 23 |
| 6.3 ÚHEL REDUKČNÍHO KUŽELU | 23 |
| 6.4 ZAOBLENÍ PŘECHODOVÝCH ČÁSTÍ REDUKČNÍHO KUŽELU | 24 |
| 6.5 MATERIÁLY VHODNÉ K PROTlačOVÁNÍ | 24 |
| 6.5.1 Oceli k protlačování | 24 |
| 6.5.2 Vliv protlačování na mechanické vlastnosti oceli | 25 |
| 6.6 TŘENÍ | 25 |
| 7 VÝSTUPNÍ VELIČINY | 26 |
| 7.1 MAXIMÁLNÍ PROTlačOVACÍ SÍLA | 26 |
| 7.1.1 Teoretický výpočet | 26 |
| 7.2 KONTAKTNÍ TLAK | 27 |
| 7.3 NEHOMOGENITA PLASTICKÉ DEFORMACE | 27 |
| 7.4 OSOVÉ NAPĚTÍ | 27 |
| 8 PREZENTACE VÝSLEDKŮ | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 8.1 PROTlačOVACÍ SÍLA | 29 |
| 8.1.1 Vliv redukce | 30 |
| 8.1.2 Vliv délky polotovaru..... | 30 |
| 8.1.3 Vliv úhlu redukce | 31 |
| 8.1.4 Vliv zaoblení přechodových částí průtlačnice..... | 33 |
| 8.1.5 Vliv materiálu | 34 |
| 8.1.6 Vliv tření..... | 35 |
| 8.2 MAXIMÁLNÍ KONTAKTNÍ TLAK | 36 |
| 8.2.1 Vliv redukce | 37 |
| 8.2.2 Vliv délky polotovaru..... | 38 |
| 8.2.3 Vliv úhlu redukce | 39 |
| 8.2.4 Vliv zaoblení přechodových částí průtlačnice..... | 40 |
| 8.2.5 Vliv materiálu | 41 |
| 8.2.6 Vliv tření..... | 41 |
| 8.3 NEHOMOGENITA PLASTICKÉ DEFORMACE | 42 |
| 8.3.1 Vliv redukce | 43 |
| 8.3.2 Vliv délky polotovaru..... | 43 |
| 8.3.3 Vliv úhlu redukce | 43 |
| 8.3.4 Vliv zaoblení přechodových částí průtlačnice..... | 45 |
| 8.3.5 Vliv materiálu | 45 |
| 8.3.6 Vliv tření..... | 45 |
| 8.4 OSOVÉ NAPĚTÍ..... | 46 |
| 8.5 VLIV ROZDĚLENÍ REDUKCE DO DVOU KROKŮ..... | 50 |
| 8.6 VLIV HUSTOTY SÍTĚ | 51 |
| 9 ZÁVĚR..... | 53 |
| 10 LITERATURA | 54 |

1 ÚVOD

Protlačování za studena je u lehkých a barevných kovů známo a používáno již přes 100 let. Protlačování ocelí bylo naproti tomu umožněno teprve vynálezem operace fosfátování, která výrazně snižuje součinitel tření mezi materiálem a nástrojem. Protlačování je moderní výrobní metoda, která dosáhla po druhé světové válce širokého uplatnění v průmyslu zejména při sériové a hromadné výrobě a její snadná mechanizace a automatizace posouvá tuto metodu do popředí zájmu.

Dopředné protlačování získává stále širší uplatnění při výrobě symetrických součástí, protože má na rozdíl od obrábění nebo jiných výrobních metod řadu výhod. Především je to podstatná úspora výrobního materiálu, snížení výrobních časů, zvýšení produktivity a snížení výrobních nákladů. Výrobky protlačované za studena mají mimořádně dobrou jakost povrchu. Fosfátování povrchu výchozího materiálu nebo polotovaru před protlačováním, vedoucí ke snížení tření, a značné zpevnění povrchu, způsobené velkými měrnými tvářecími tlaky, vytváří povrchovou vrstvu, jejíž hloubka drsnosti je mezi jemným broušením a leštěním. Protože dochází ke zpevňování materiálu, má tvářený materiál vyšší mez kluzu a mez pevnosti, a proto lze pro daný účel použít méně hodnotného výchozího materiálu. Protlačování probíhá bez porušení soudržnosti materiálu a výrobky mají dobrou přesnost (IT 8 až IT 10).

Efektivnost technologie dopředného protlačování je dána správnou funkcí a životností tvářecích nástrojů. Tyto podmínky lze podstatně ovlivnit jejich konstrukcí. Tu ovlivňuje mnoho činitelů. Mezi nejdůležitější patří geometrie nástroje, vlastnosti nástrojové oceli a její tepelné zpracování.

Tato práce se zabývá dopředným protlačováním plných těles kruhového průřezu za studena a namáháním průtlačnice. Při dopředném protlačování teče materiál ve směru pohybu průtlačku a tvářením za studena se rozumí tváření pod rekrytalizační teplotou. Průtlačnice je ta část nástroje, do níž se vkládá polotovar, a která udává vnější tvar tvářené součásti. Aby se snížilo namáhání průtlačnice, je opatřena objímkou. Výrobek se nazývá průtlaček. Tímto způsobem se vyrábějí např. čepy a šrouby.

Snahou technologů a konstruktérů je navrhnout průtlačnici tak, aby k protlačování bylo zapotřebí co nejmenší protlačovací síly, a zároveň aby byla co nejméně namáhána a tím se zvýšila její životnost, a přitom aby byla zajištěna kvalita produktu. Z důvodů zadírání polotovaru v průtlačnici nebo kvůli snížení jejího namáhání bývá někdy redukce rozdělena do dvou kroků.

Ačkoliv je tato práce zaměřena na namáhání průtlačnice, je třeba věnovat pozornost i napjatosti v průtlačku. V něm vznikají v důsledku nehomogenity plastické deformace významná tahová napětí, která mohou způsobit vznik vnitřních trhlin na ose průtlačku. Tyto trhliny jsou obtížně detekovatelné.

Pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP) lze proces dopředného protlačování simulovat a určit tak nejen stav napjatosti průtlačnice a průtlačku, ale i sílu potřebnou k protlačení polotovaru. Takto je možno zjistit vliv geometrických a materiálových charakteristik na veličiny, které ovlivňují životnost průtlačnice a kvalitu průtlačku, aniž by bylo nutné provést nákladné experimenty.

2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

2.1 FORMULACE PROBLÉMU

Pomocí simulačního výpočtového modelování procesu dopředného protlačování za studena stanovit vliv procesních parametrů (tření, velikost redukce, redukčního úhlu, materiálu) na namáhání průtlačnice.

2.2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je stanovení závislosti mezi mechanickým namáháním kritických částí pracovního povrchu průtlačnice a geometrickými a materiálovými charakteristikami procesu protlačování.

3 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

Systém podstatných veličin byl vytvořen podle [1]:

Objekt: průtlačnice

Prvky okolí objektu: objímka, polotovar

1. veličiny popisující objekt

- geometrie, materiál

2. vazby a interakce

- průtlačnice – objímka: přesah, koeficient tření
- průtlačnice – průtlaček: koeficient tření

3. aktivační veličiny

- deformační zatížení v podobě posuvů

4. ovlivňující veličiny

- protlačovaný materiál
- délka polotovaru
- tření
- teplota

5. vlastnosti objektu

- redukce průřezu
- úhel redukčního kuželu
- poloměr zaoblení přechodových částí
- materiál průtlačnice

6. procesy a stavy

- deformační a napěťové stavy, protlačovací síla

7. projevy

- trhliny, (vnitřní trhliny v průtlačku)

8. důsledky

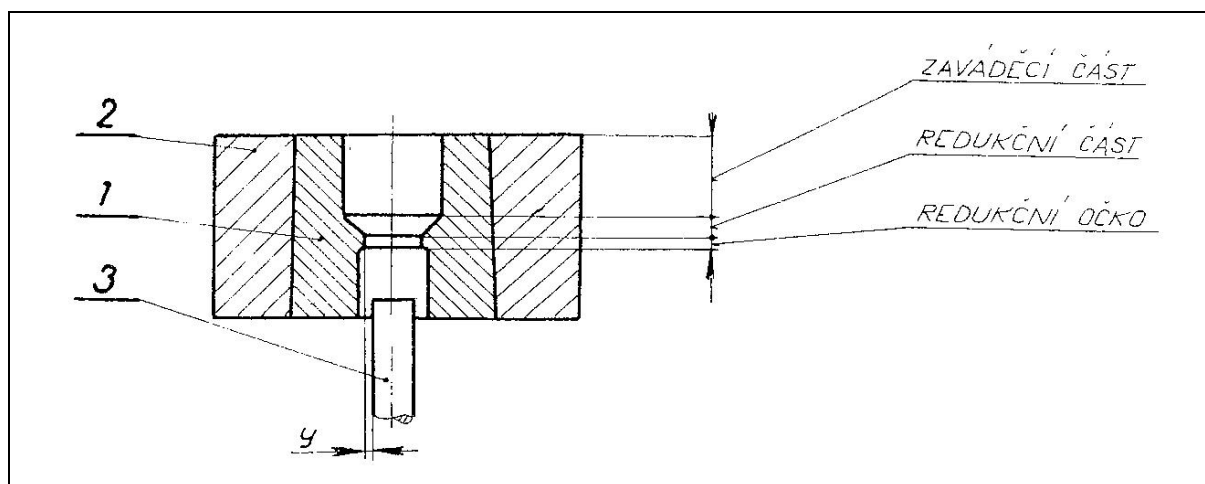
- životnost, (kvalita průtlačku)

Jedná se o přímý problém, vstupy jsou příčiny a struktura, výstupy jsou následky.

4 PRŮTLAČNICE

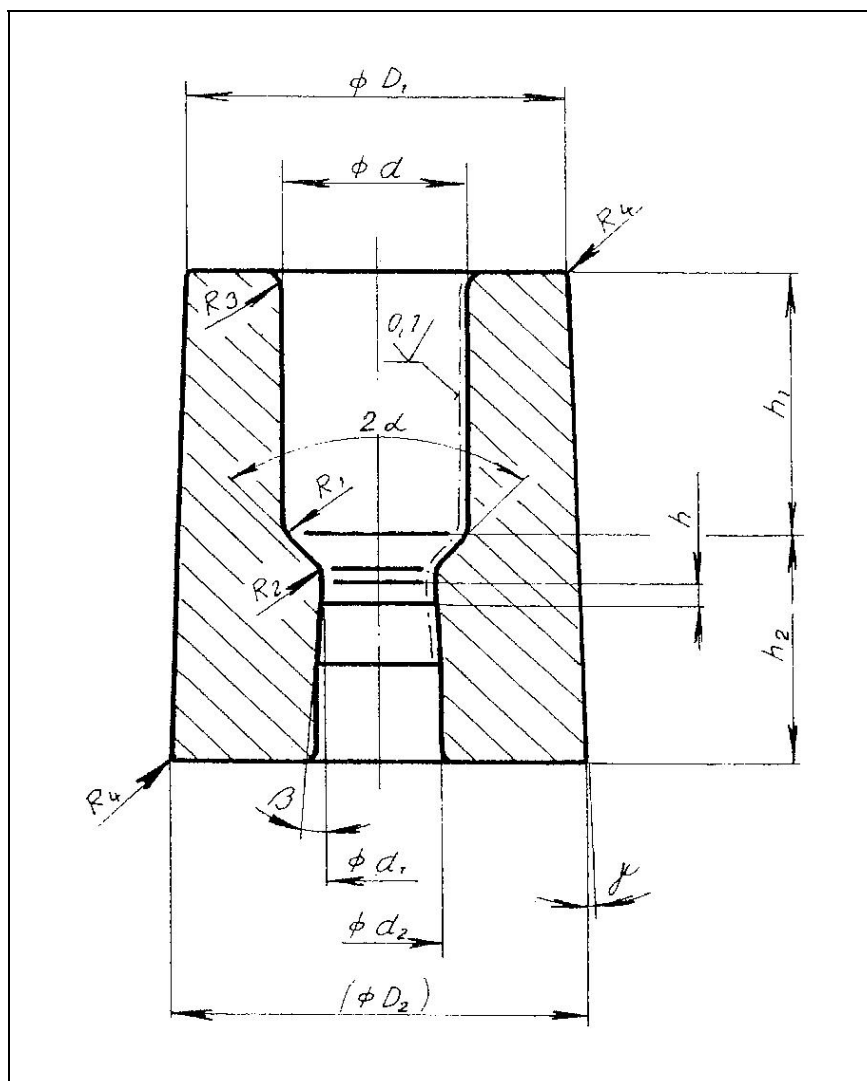
4.1 KONSTRUKCE PRŮTLAČNICE [2]

Průtlačnice jsou jednou z nejdůležitějších a nejvíce namáhaných funkčních částí tvářecího nástroje. Při konstrukčním řešení je proto nutno věnovat velkou pozornost nejen tvaru funkční dutiny, ale celkovému provedení a uložení průtlačnice. Tvar dutiny je v hlavních rysech určen požadovaným tvarem tvářené součásti a použitým způsobem objemového tváření. Typický příklad průtlačnice pro dopředné protlačování je na obr. 1. Dutina je tvořena zaváděcí částí, do které se vkládá polotovar, redukční částí a redukčním očkem.



Obr. 1 Průtlačnice pro dopředné protlačování (1 – průtlačnice, 2 – objímka, 3 – vyhazovač, y – vůle mezi vyhazovačem a průtlačnicí) [2]

Osvědčený tvar průtlačnice pro dopředné protlačování na obr. 2. Válcová dutina průtlačnice má pro snadnější zavedení polotovaru náběhový kužel nebo v tomto případě rádius. Dutina průměru d přechází do pracovního průměru d_1 kuželovou plochou s vrcholovým úhlem 2α . Výšku redukčního oka h volíme v závislosti na teplotě tváření. Průtlačnice je odlehčena na průměr d_2 a přechod je proveden pozvolně, aby se průtlaček při vysouvání nepoškodil. Výška dna průtlačnice h_2 musí při protlačování zaručit dostatečnou pevnost, a proto volíme $h_2 = \min(0,7 \cdot d)$. Pracovní hloubku h_1 u krátkých průtlačků určuje výška polotovaru a požadavek, aby horní kraj průtlačnice byl asi o 5 mm výše než horní okraj polotovaru, aby průtlačník byl před započítím tvářecího procesu veden a zvýšila se tím jeho vzpěrná stabilita. Při protlačování dlouhých polotvarů, eventuálně jsme-li omezeni délkou zdvihu beranu a rozevřením lisu, nelze využít uzavřeného dopředného protlačování a výšku dutiny h_1 potom volíme vysokou pouze tolik, aby zajistila dostatečné uchycení polotovaru. Při tomto způsobu protlačování jsme však omezeni určitým stupněm deformace, při kterém dochází ke zborcení nebo napěchování volné části polotovaru.

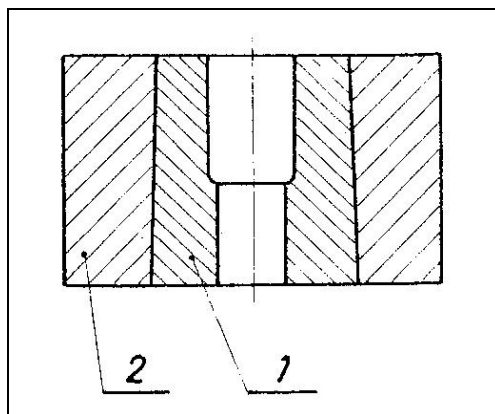


Obr. 2 Průtlačnice pro dopředné protlačování [2]

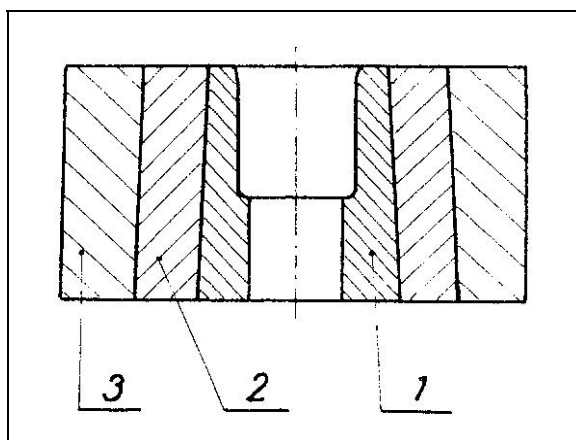
Rozhodujícím geometrickým parametrem tvářecích nástrojů při dopředném protlačování je tvar redukční části průtlačnice, který nejvíce ovlivňuje velikost protlačovacích sil při daném stupni deformace, mazacích podmínkách a tvářeném materiálu. Nejčastěji používaný tvar redukční části průtlačnice je kužel, který je z výrobního hlediska nejlépe vyrobitelný.

Snížení vrubového účinku v oblasti přechodu válcové části průtlačnice v kuželovou lze dosáhnout dělením průtlačnice v kritickém místě. Musí však být zabráněno zabíhání materiálu do dělicí roviny. Je tedy nutný těsný styk mezi oběma částmi průtlačnice. Výhodou tohoto řešení je snadná výměna vložky, dojde-li k jejímu opotřebení.

Pro zvýšení únosnosti průtlačnice je výhodné vytvořit v ní předpětí, působící vhodným směrem proti účinkům vnitřního zatížení. Radiální a tangenciální napětí lze částečně eliminovat zděřováním (bandážováním) průtlačnic. Přitom jednoduše zděřovanou průtlačnici (obr. 3) lze všeobecně použít pro vnitřní tlaky menší než 1600 MPa. Pro vyšší tlaky je nutné použít dvojnásobně zděřovanou průtlačnici (obr. 4).

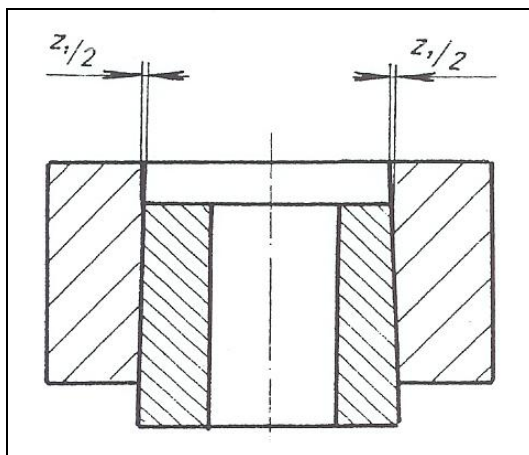


Obr. 3 Jednoduše zděrovaná průtlačnice (1 – průtlačnice, 2 – zděř) [2]



Obr. 4 Dvojnásobně zděrovaná průtlačnice (1 – průtlačnice, 2 – vnitřní zděř, 3 – vnější zděř) [2]

Montáž průtlačnice a zděře může být provedena dvojím způsobem. Buď nahrátím zděře zvětšíme její vnitřní průměr natolik, abychom mohli průtlačnici volně vložit do zděře, nebo použijeme kuželového povrchu stykových ploch průtlačnice a zděře, a průtlačnici do zděře zalisujeme. Druhého způsobu se užívá ve většině případů (i když výroba je dražší) z důvodu snadnější montáže. Velikost přesahu mezi průtlačnicí a zděří (viz obr. 5) se volí podle vnitřního tlaku 0,005 – 0,008 mm na každý milimetr vnějšího průměru průtlačnice.



Obr. 5 Přesah u jednoduše zděrované průtlačnice [2]

4.2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU PRŮTLAČNIC [2][3][4]

Požadavky na nástrojové oceli, z nichž se vyrábějí průtlačnice, jsou velmi vysoké, všeobecně se požadují tyto vlastnosti:

- velká odolnost proti tlakovému a rázovému zatížení
- dostatečná houževnatost
- velká odolnost proti opotřebení
- velká popouštěcí teplota
- dobrá obrobitelnost

Požadavkům na vlastnosti nástroje vyhovuje např. ocel 19 830. Lépe však ocel 19 437, příp. při požadavku vyšší houževnatosti ocel 19 572. Průtlačnice lze také vyrábět ze slinutých karbidů G3, G4, G5.

4.3 NAMÁHÁNÍ PRŮTLAČNIC A JEJICH ŽIVOTNOST [2]

Nástroje typu průtlačnic jsou namáhány tahovým napětím tangenciálním na vnějším obvodu nástroje, někdy také tahovým napětím axiálním na obvodu dutiny nástroje. Redukční části průtlačnic pro dopředné protlačování jsou vysoce namáhány otěrem, zejména při zpracování legovaných ocelí s vyšším obsahem uhlíku.

Zděře patří do kategorie nástrojů bezprostředně se nestýkajících s tvářeným materiálem, přesto však aktivně spolupůsobících při tvářecím pochodu. Jejich účelem je dosažení optimálního namáhání průtlačnice při jejím zatížení pracovním tlakem vytvořením předpětí v tangenciálním i radiálním směru.

Trvanlivost a životnost nástrojů pro objemové tváření za studena je jedním z limitujících faktorů celé technologie. Tato skutečnost vyplývá jednak z ceny používaných vysokolegovaných nástrojových a rychlořezných ocelí, tak i z vysoké pracnosti dané složitostí tvaru, požadavky na jakost povrchu apod. V popředí zájmu technologie i konstruktéra nástroje je proto snaha eliminovat tyto vysoké náklady dosažením optimální trvanlivosti a životnosti nástrojů. Správnou funkci tvářecího nástroje a jeho životnost podstatně ovlivňují vlastní provozní podmínky.

Častou příčinou snížené životnosti tvářecího nástroje je nevhodně tepelně zpracovaný materiál určený pro tváření, materiál s povrchovými vadami a nevhodnou povrchovou úpravou. V důsledku toho dochází v průběhu tváření k nerovnoměrnému zatěžování tvářecího nástroje, k jeho zvýšenému opotřebení, případně rychlému zadření. To se současně nepříznivě projeví na kvalitě a rozměrové přesnosti průtlačků.

Velký vliv na životnost tvářecích nástrojů má použitý tvářecí stroj, jeho tuhost, technické parametry a stav. U strojů nedostatečně tuhých, případně ve špatném technickém stavu dochází při vlastním tváření k vyosení nástroje a tím k jeho ohybovému namáhání a zvýšení namáhání na otěr, což se nepříznivě projeví nižší životností nástroje a menší rozměrovou přesností průtlačků. V případě, že není k dispozici vhodnější lis, je třeba tvářecí nástroj uložit do dostatečně tuhého vodícího stojánu, který bude nepřesnosti stroje eliminovat na minimum.

Při konstrukci tvářecího nástroje je často podceňována podmínka odvodu vzduchu, která však může být často zdrojem jeho porušení. Je tudíž bezpodmínečně nutné, aby řešení tvářecího nástroje umožňovalo volný odchod vzduchu, maziva a chladicí kapaliny, které se v průběhu tváření nachází v nástroji.

Životnost tvářecího nástroje je rovněž ovlivněna plynulostí tvářecího procesu. Při přerušovaném chodu stroje se zvyšuje tepelné namáhání tvářecích nástrojů, což se opět nepříznivě projeví na jejich životnosti.

S ohledem na zbytková napětí vzniklá v tvářecím nástroji v průběhu jeho opracování bylo prokázáno, že nástroje čerstvě vyrobené vykazovaly při tváření daleko nižší životnost než nástroje, které byly vyrobeny s několika měsíčním časovým předstihem. Tuto skutečnost je nutno brát v úvahu a pro zajištění vyhovující životnosti tvářecích nástrojů je třeba před vlastním tvářením uvedená zbytková napětí v nástroji odstranit. To je možno zajistit přirozeným stárnutím tak, že vyrobíme nástroj v dostatečném časovém předstihu před jeho použitím a nebo stárnutím umělým. Jako nejvhodnější se jeví ohřátí tvářecích nástrojů v oleji na teplotu 150 – 200 °C a ponechání na této teplotě po dobu cca 12 hod.

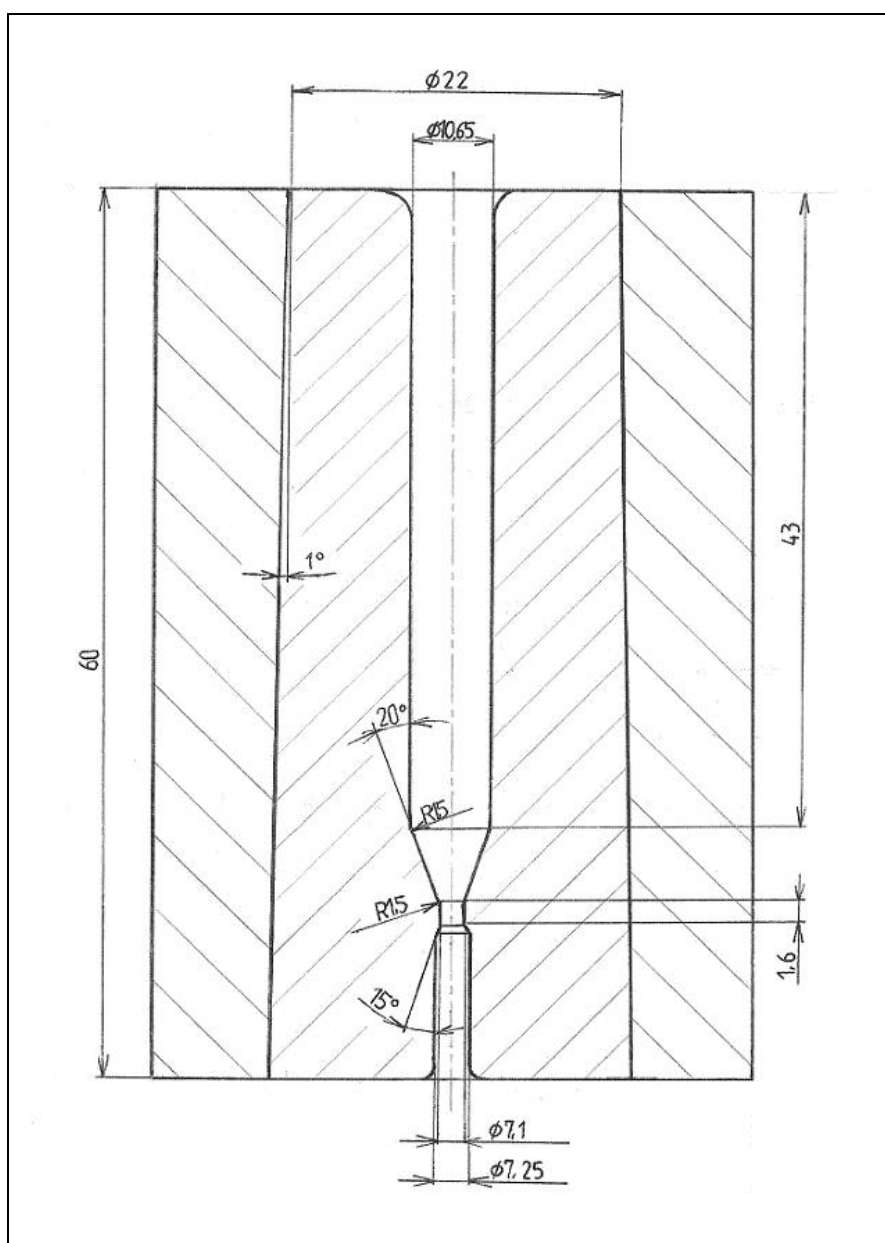
Životnost nástroje v souvislosti s vhodným strojním zařízením závisí také na jeho správném seřízení a obsluze. Pro zajištění správné funkce tvářecích nástrojů je třeba věnovat zvýšenou pozornost tzv. slícování nástrojů, to znamená zajistit co nejdokonalejší sousost mezi jednotlivými funkčními elementy, a tím vyloučit přídatná ohybová a tahová namáhání.

Ještě před zabudováním tvářecího nástroje do lisu je třeba zkontrolovat a upravit všechny funkční plochy, zaoblení, přechody, sražení, odvzdušnění apod., které mohou podstatně ovlivnit správný tok tvářeného materiálu a tím i vlastní namáhání nástroje.

5 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Zadaný problém byl řešen MKP systémem ANSYS 11.0. Jedná se o nelineární úlohu z hlediska geometrie (velké deformace), materiálu a kontaktů. Součástí práce [5] byl vytvořený výpočtový model procesu protlačování materiálu 17 240 protlačovaného z průměru 7,45 mm na průměr 6,4 mm, který byl verifikován pomocí experimentálních výsledků. Z minimalizace rozdílů výpočtových a experimentálně zjištěných protlačovacích sil byl určen koeficient tření 0,085. Na základě tohoto modelu jsem vytvořila dva výpočtové modely.

První výpočtový model byl vytvořen pro geometrii průtlačnice a objímky na obr. 6 (redukce z průměru 10,65 mm na 7,1 mm), délku polotovaru jsem zvolila 20 mm. Tento model byl využit pro stanovení vlivu geometrických a materiálových charakteristik na maximální protlačovací sílu, kontaktní tlak, nehomogenitu plastické deformace a vznik tahových napětí na ose průtlačku.



Obr. 6 Základní rozměry průtlačnice

Byly uvažovány dvě kontaktní plochy. Jedna stacionární mezi nástrojem a vnější objímkou, nalisováno s přesahem 0,075 mm na poloměru 11 mm. Druhá mezi nástrojem a materiálem je nestacionární, mazaná – uvažován koeficient tření 0,085 stejně jako v [5].

Zatížení je zadáno posuvem 9,5 mm na horní hraně polotovaru v jednom zatěžovacím kroku (loadstepu). Počet substepů je 104, počet iterací je 724. Výpočtové časy se pohybovaly řádově v desítkách minut.

Druhý výpočtový model byl vytvořen pro stanovení vlivu rozdělení redukce do dvou kroků. Skládá se ze dvou průtlačnic a dvou objímek, jejichž geometrie vytvořena podle obr. 6, a z polotovaru – délka zvolena 30 mm.

Kontaktní plochy jsou čtyři. Dvě stacionární mezi průtlačnicí 1 a objímkou 1 a mezi průtlačnicí 2 a objímkou 2 (obr. 8), obě objímky nalisovány s přesahem 0,075 mm na poloměru 11 mm. Další dvě kontaktní plochy jsou nestacionární mezi průtlačnicemi a polotovarem. Na těchto plochách je uvažován koeficient tření 0,085.

Výpočet probíhá ve třech krocích. V prvním kroku je polotovar zatížen na horní hraně posuvem 25 mm a je protlačen průtlačnicí 1. Průtlačnice 1 se ve druhém kroku posune dolů, je zatížena posuvem 100 mm. Ve třetím kroku je průtlaček opět zatížen na horní hraně posuvem 25 mm a je protlačen průtlačnicí 2.

Byly řešeny tři varianty, výchozí průměr polotovaru byl vždy 10,65 mm a konečný 7,1 mm. Rozdělení redukcí však bylo různé viz tab. 1. Počet substepů a iterací je uveden v tabulce 2. Výpočtové časy se pohybovaly v řádu hodin.

Tab. 1 Rozdělení redukce do dvou kroků

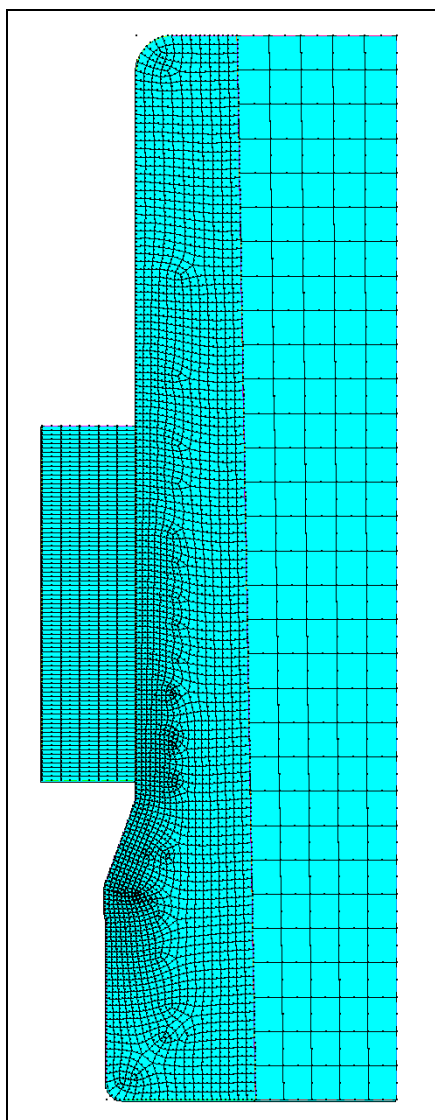
| Varianta | Redukce v 1. kroku [%] | Redukce ve 3. kroku [%] |
|----------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 49 (Ø10,65-7,6) | 13 (Ø7,6-7,1) |
| 2 | 42 (Ø10,65-8,1) | 23 (Ø8,1-7,1) |
| 3 | 29 (Ø10,65-9) | 38 (Ø9-7,1) |

Tab. 2 Počet loadstepů a iterací pro varianty s rozdělením redukce do dvou kroků

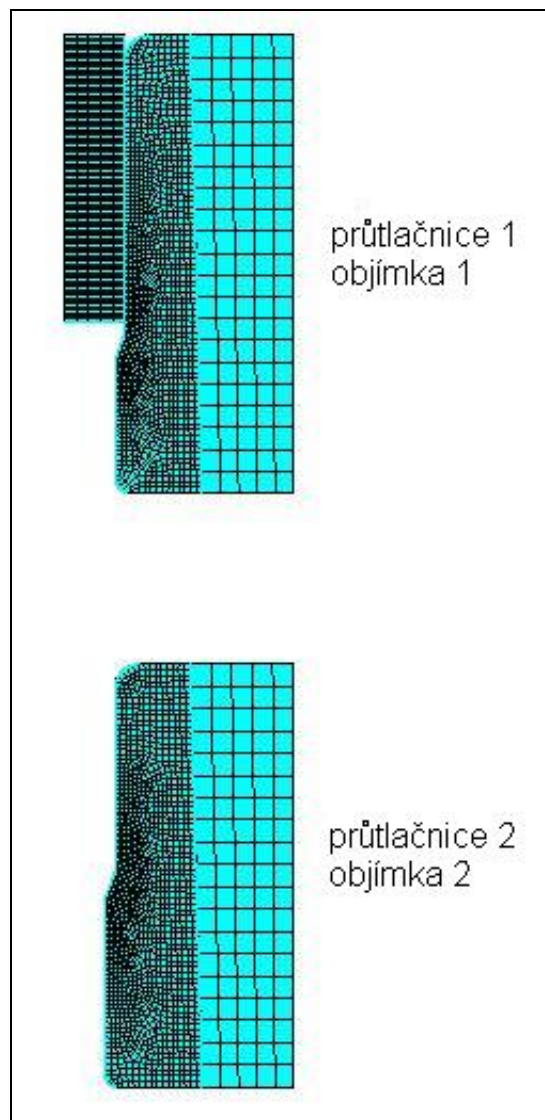
| Varianta | Zatěžovací krok (loadstep) | Počet substepů | Počet iterací v daném substepu |
|----------|----------------------------|----------------|--------------------------------|
| 1 | 1 | 257 | 1530 |
| 1 | 2 | 1006 | 3612 |
| 1 | 3 | 261 | 5443 |
| 2 | 1 | 255 | 1096 |
| 2 | 2 | 1046 | 4489 |
| 2 | 3 | 270 | 6201 |
| 3 | 1 | 255 | 968 |
| 3 | 2 | 1005 | 2897 |
| 3 | 3 | 260 | 3985 |

5.1 KONEČNOPRVKOVÁ SÍŤ

Obě úlohy byly řešeny jako osově symetrické, pohled na síť konečných prvků je na obr. 7 a 8, nejjemnější diskretizace bylo použito pro tvárný materiál polotovaru a v oblasti intenzivně namáhané zúžené části průtlačnice. Bylo použito osmiuzlových kvadratických prvků typu PLANE 183 a kontaktní prvky CONTA 169 a TARGE 172.



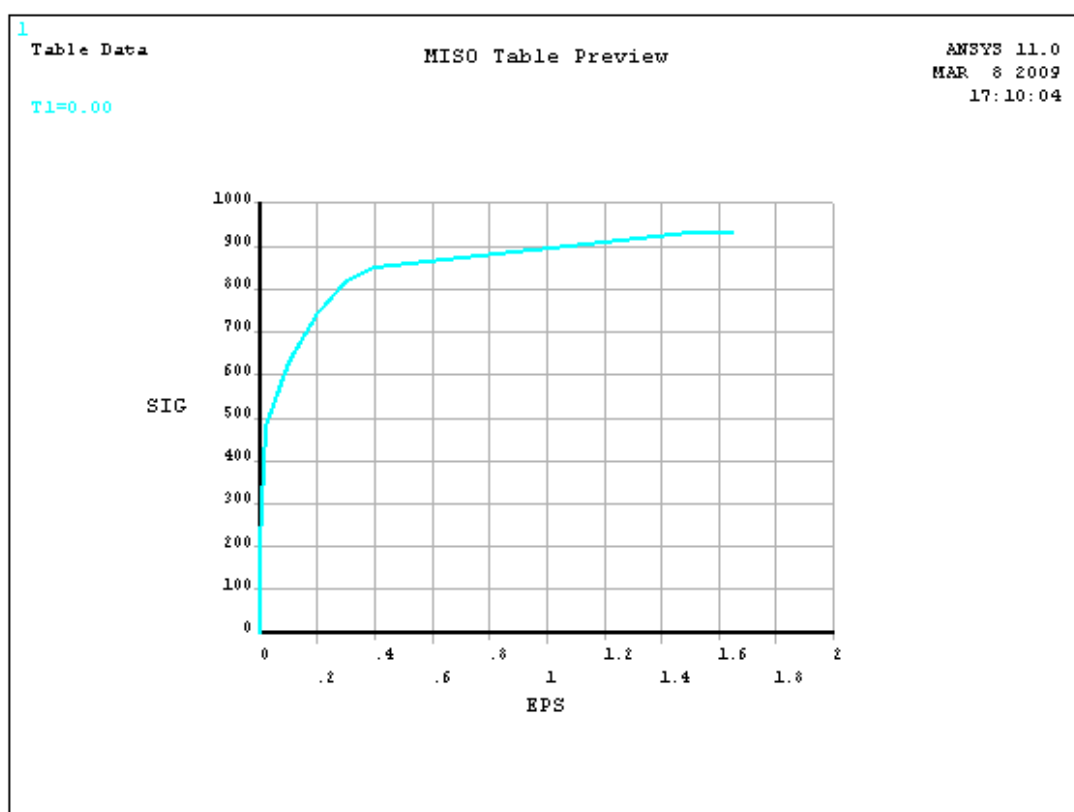
Obr. 7 Síť MKP



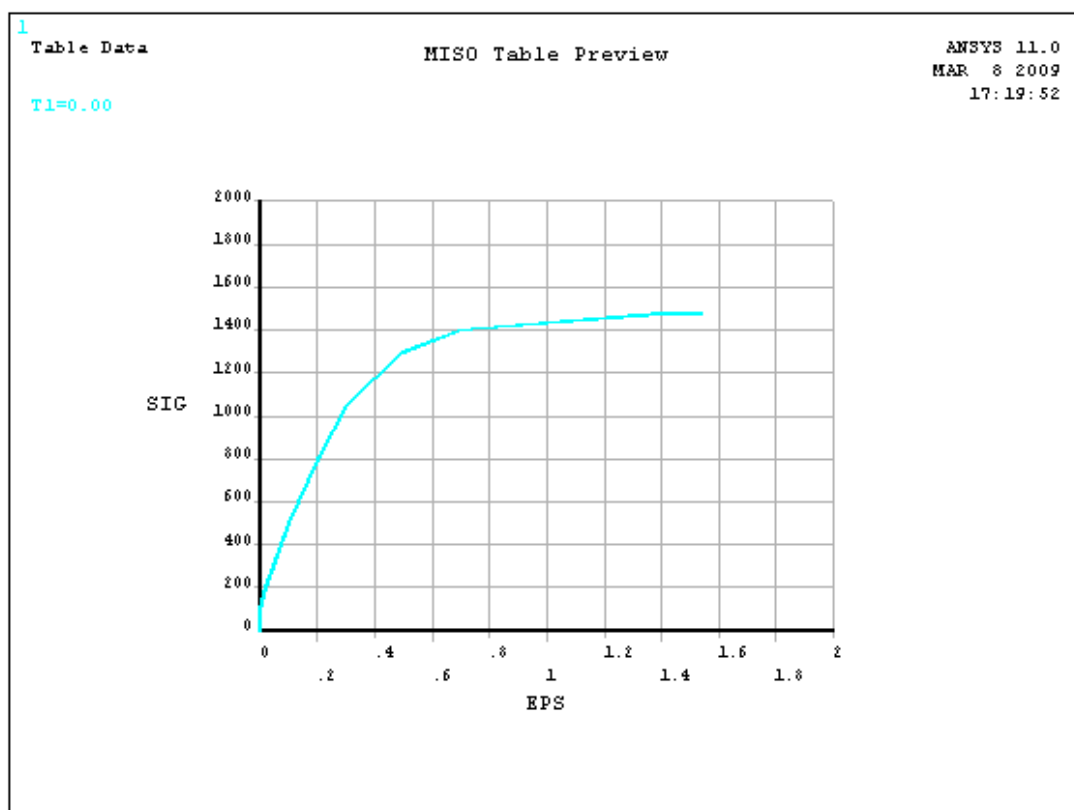
Obr. 8 Síť MKP – varianta se dvěma průtlačnicemi.

5.2 MODELÝ MATERIÁLŮ

Materiál průtlačnic a objímek byl uvažován elastický v celém rozsahu zatěžování (modul pružnosti v tahu $E = 210\,000$ MPa, Poissonovo číslo $\mu = 0,3$). Jako materiál polotovaru byly použity dva druhy oceli: 17 240 (dále uváděn jako materiál 1) a speciální ocel TRISTAL, český ekvivalent ocel 12 014 (dále uváděn jako materiál 2). Byly modelovány jako elasticko plastické materiály s mezí kluzu $Re = 350$ MPa a $Re = 186$ MPa, izotropním zpevněním a křivkou přetvárného odporu získanou z [5] viz obr. 9 a 10.



Obr. 9 Křivka přetvárného odporu materiál 1 [5]



Obr. 10 Křivka přetvárného odporu materiál 2 [5]

6 GEOMETRICKÉ A MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY MAJÍCÍ VLIV NA PROCES PROTlačOVÁNÍ

6.1 REDUKCE

Redukce pro protlačování plného kruhového průřezu je definována jako:

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{R^2}{R_0^2}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Její velikost ovlivňuje značně celkový spotřebovaný výkon, ovlivňuje také napjatost podél stěny průtláčnice.

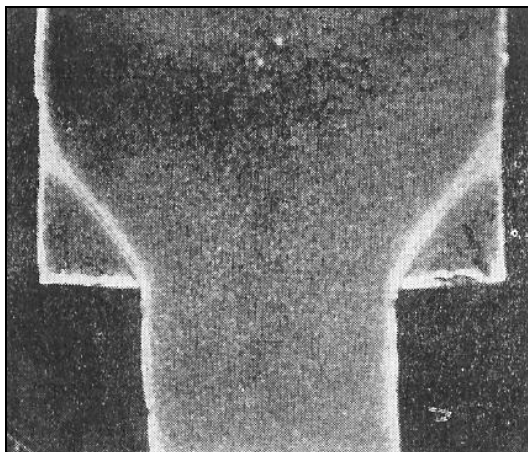
6.2 DÉLKA POLOTOVARU

Čím je větší délka polotovaru, tím větší objem materiálu je třeba protlačit. S délkou polotovaru se zvětšuje plocha na níž se polotovar stýká s průtláčnicí a tudíž se zvětšuje i tření. Lze tedy očekávat, že se zvětšující se délkou polotovaru bude potřeba větší protlačovací síly.

6.3 ÚHEL REDUKČNÍHO KUŽELU

Velikost vrcholového úhlu redukčního kuželu značně ovlivňuje velikost protlačovacích sil a hladkost povrchu výrobku. Podle Zanerniho [5] s rostoucím redukčním úhlem protlačovací síla klesá až do určité hodnoty a od této hodnoty zase roste. Hodnotu úhlu, při kterém je protlačovací síla nejmenší nazývá optimální a značí ji α_{opt} . Zanerni také došel k závěru, že volba úhlu $\alpha = \alpha_{\text{opt}}$ nebyla výhodná. Přestože tento úhel odpovídá minimální potřebné protlačovací síle, dokázalo se, že právě pro tento úhel má tvářený materiál velkou tendenci k vytvoření centrálních dutin.

Dále také Zanerni definuje kritický úhel α_{cr} , při jehož překročení dochází k vytvoření tzv. mrtvého kuželu (obr. 11). Na něm se v další fázi protlačování materiál smýká. Materiál mrtvého kuželu se však během tvářecího děje nevyměňuje. Je tedy patrné, že materiál si sám utvořil nový úhel k usnadnění jeho toku. Jakmile si materiál mrtvý kužel vytvoří, pak se protlačovací síla stabilizuje. Vzniklý mrtvý kužel má nepříznivý vliv na hladkost povrchu výrobků, protože povrchy stejných materiálů se smýkají a dochází k částečnému zadření. I přes existenci tohoto nežádoucího jevu se často používá složené zápusty bez kuželové redukční části a to z důvodu ekonomického a jednoduchosti výroby. Farlík [7] uvádí, že úhel 2α , který si materiál sám vytvoří bývá v praxi větší než 30° . Obvykle se pohybuje od 90° do 120° .



Obr. 11 Mrtvý kužel [7]

Také v [2] je optimální redukční úhel definován jako redukční úhel, při kterém je protlačovací síla minimální. Tento úhel není konstantní pro všechny stupně deformace. Optimální úhel je zde definován v závislosti na koeficientu tření a středním logaritmickém přetvoření jako:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \mu_R \ln \frac{D_0^2}{D_1^2}} \quad (2)$$

kde μ_R je koeficient tření v redukční části průtlačnice, D_0 je počáteční průměr polotvaru a D_1 je konečný průměr průtlačku.

6.4 ZAOBLNÍ PŘECHODOVÝCH ČÁSTÍ REDUKČNÍHO KUŽELU

Poloměry zaoblení přechodových částí jsou poloměry R_1 a R_2 viz obr 2. V [2] se pro ně uvádí hodnoty:

$$R_1 = (D_0 - D_1)/2 \quad (3)$$

$$R_2 = (0,05 \div 0,1) \cdot D_1 \quad (4)$$

6.5 MATERIÁLY VHODNÉ K PROTLAČOVÁNÍ [2][3]

6.5.1 Oceli k protlačování

Teoreticky je možno zpracovávat protlačováním všechny druhy ocelí. V praxi je však tato možnost silně omezena maximální potřebnou protlačovací silou. Mechanické vlastnosti oceli, z níž je vyroben nástroj, musí být hodnotnější než vlastnosti oceli, která má být v tomto nástroji protlačována jako polotovar.

Se stoupajícím obsahem uhlíku a legujících prvků ubývá oceli tvárnosti za studena a vzrůstá odpor proti deformaci. Obsah 1,6 % uhlíku znamená prakticky horní mze tvárnosti oceli za studena, kdežto pro protlačování za studena je tato mez asi 0,45 % uhlíku. Nečistoty

jako síra, fosfor, kyslík a dusík zhoršují všeobecně tvárnost, tedy i vhodnost oceli k protlačování za studena. Tvárnost oceli za studena je možno zvýšit určitým předchozím tvářením za tepla (např. válcováním za vysoké teploty aj.) a tepelným zpracováním. V praxi se posuzuje tvárnost za studena, resp. schopnost k protlačování, podle mechanických vlastností, podle chemického složení, podle deformačních křivek a podle speciálních zkoušek.

Ocel k protlačování má mít co nejvyšší tažnost, co nejvyšší kontrakci (doporučuje se větší než 55 %), co nejnižší mez kluzu a poměr meze kluzu k mezi pevnosti v rozmezí 0,5 – 0,6. Uvedeným požadavkům vyhovují oceli s nízkým obsahem uhlíku (doporučuje se do 0,45 %), s nízkým obsahem fosforu a síry (doporučuje se do 0,035 %) a nízkým obsahem nekovových vměstků.

Ocel k protlačování má být co nejtvárnější, tomu odpovídá struktura feritická nebo feriticko-perlitická, přičemž perlit má být globulární. Vhodné struktury lze také dosáhnout kombinovaným žháním, tj. normalizačním žháním ke zrovnoměnění zrna a následujícím žháním na měkko k dosažení nejnižší tvrdosti a nejvyšší tvárnosti.

Povrch oceli má být bez viditelných vad jako jsou rýhy, trhliny a opatřený vhodnou nosnou vrstvou pro maziva např. fosfátováním, oxalátováním a případným nasycením povrchu mazivem. Takto připravený materiál je předpokladem k správné funkci tvářecího nástroje při dosažení jeho optimální životnosti.

6.5.2 Vliv protlačování na mechanické vlastnosti oceli

Tvářením za studena se podstatně mění mechanické a fyzikální vlastnosti kovů. Dochází ke vzrůstu pevnosti a meze kluzu, tažnost a kontrakce se snižují, zhoršuje se tepelná a elektrická vodivost, mění se magnetické vlastnosti a zhoršuje se svařitelnost kovu. Při tvářením na více operací se zpevnění získaná jednotlivými operacemi sčítají, po vyčerpání tvářecí schopnosti materiálu je nutné zařadit operaci žhání a povrchové úpravy.

6.6 TŘENÍ [2][7]

Důležitou veličinou charakterizující vzájemný styk dvou těles při relativním pohybu je součinitel tření, definovaný jako poměr smykového a normálního napětí ve stykové ploše. Tření ve stykové ploše tvářeného materiálu s nástroji podstatně ovlivňuje celý průběh tvářením. Způsobuje změnu napjatosti a energií potřebných pro tvářením a trvanlivost nástrojů. Jeho velikost je u statického tvářením ovlivněna hlavně vlastnostmi stýkajících se materiálů, stavem stykových ploch a mazáním.

Třecí podmínky mají vliv nejen na průběh tečení kovu, ale též na velikost lisovací síly. Závisí na drsnosti povrchu stykových ploch a na způsobu mazání. Volba maziva se řídí druhem protlačovaného kovu. Mazivo musí vytvořit dobře lpící mazací film, který se neporuší ani při vysokých teplotách, musí být teplotně stálé a nesmí reagovat s protlačovaným materiálem ani nástroji. Při protlačování oceli a dalších obtížně lisovatelných materiálů se používá jako mazivo sklo nebo látky na jeho bázi. Také se používají maziva na bázi fosfátů, ve vodě rozpustná mýdla, neemulgující minerální oleje a živočišné a rostlinné tuky.

7 VÝSTUPNÍ VELIČINY

7.1 MAXIMÁLNÍ PROTlačOVACÍ SÍLA [3][7]

Při protlačování nastává přetvoření nepřímým působením tlaku, neboť tvářený materiál se pohybuje působením vnějších sil mezerou vytvořenou tvářecím náradím (mezi průtlačníkem a průtlačnicí).

Průběh tvářecí síly je důležitou charakteristikou každého tvářecího procesu. Z průběhu tvářecí síly je možné určovat základní mechanické vlastnosti charakterizující tvářený materiál, jako je přetvárný odpor. Měření síly mají tu výhodu, že je možno zachytit průběh síly po dobu trvání celé operace, tj. ve formě pracovního diagramu. Tento pracovní diagram umožňuje stanovit potřebu síly v každém bodě dráhy beranu. Právě tak je možné na základě zjištěné plochy diagramu získat potřebnou práci pro tuto pracovní operaci.

Znalost průběhu tvářecí síly je také důležitá pro navrhování a konstrukci jak nástrojů, tak i tvářecích strojů. Odborník může na základě získaného pracovního diagramu volit nejvýhodnější lis pro příslušnou pracovní operaci. Otázkám měření tvářecí síly je všeobecně věnována velká pozornost.

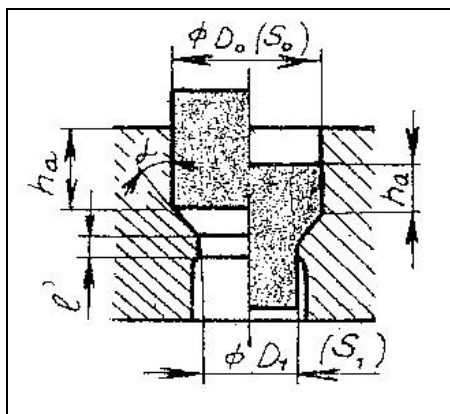
7.1.1 Teoretický výpočet [2]

Veškeré pevnostní výpočty funkčních částí tvářecích nástrojů vychází ze znalosti tvářecí síly (eventuelně přetvárného odporu) v dané operaci, a z ní vyplývajícího zatížení těchto částí. Pro tváření za studena se osvědčily následující výpočtové vztahy, které odpovídají skutečnosti s přesností do 10 %.

$$F = k_p \cdot S_0 \quad (5)$$

$$k_p = k_s \left[\ln \frac{S_0}{S_1} \left(1 + \frac{\mu_R}{\alpha} \right) + \frac{2}{3} \alpha + \frac{4D_1\mu_R l'}{D_0^2} + \frac{4\mu_Z h_a}{D_0} \cdot \frac{\sigma_{kt}}{k_s} \right] \quad (6)$$

| | |
|---------------|---|
| F | protlačovací síla |
| k_p | deformační (přetvárný) odpor |
| h_a | aktivní výška polotovaru v zaváděcí části průtlačnice, (výška zaváděcí části průtlačnice, ve které je polotovar ve styku s průtlačnicí) |
| D_0 | výchozí průměr polotovaru |
| D_1 | konečný průměr polotovaru |
| S_0 | $S_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$ |
| S_1 | $S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}$ |
| l' | výška redukčního oka |
| α | redukční úhel |
| σ_{kt} | mez kluzu tvářeného materiálu |
| μ_R | koeficient tření v redukční části průtlačnice |
| μ_Z | koeficient tření v zaváděcí části průtlačnice |
| k_s | střední přetvárný odpor |



Obr. 12 Veličiny pro výpočet protlačovací síly [2]

Deformační odpor vyjadřuje odpor materiálu vůči deformaci a dá se určit např. z tahové zkoušky.

7.2 KONTAKTNÍ TLAK

Kontaktní tlak mezi nástrojem a materiálem je rozhodující z hlediska životnosti průtláčnice. Kontaktní tlak nelze změřit, lze ho však stanovit pomocí výpočtového modelování.

7.3 NEHOMOGENITA PLASTICKÉ DEFORMACE

Nehomogenita plastické deformace má vliv na vznik trhlin na ose průtláčku, v této práci je hodnocena jako relativní rozkmit:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})}{\varepsilon_{ln}} \quad (7)$$

kde ε_{max} a ε_{min} jsou maximální a minimální hodnoty intenzity plastického přetvoření v průřezu a ε_{ln} je střední logaritmické přetvoření:

$$\varepsilon_{ln} = \ln \left(\frac{S_0}{S_1} \right) \quad (8)$$

kde S_0 je počáteční plocha průřezu a S_1 je konečná plocha průřezu průtláčku.

7.4 OSOVÉ NAPĚTÍ

Jako důsledek nehomogenity plastické deformace mohou na ose vzorku před vstupem do průtláčnice vznikat významná tahová napětí. Ta mohou způsobit vznik vnitřních trhlin, které jsou obtížně detekovatelné.

Podle Zanerniho [6] se tyto trhliny vytvoří při určitých kombinacích redukce, úhlu redukční části, tření a součinitele zpevnění, které mohou spolu tvořit oblast, v níž je očekáván jejich vznik. Dutina, která se vytvoří, má nejprve tvar kužele o stejném sklonu površky, jako u mrtvého kužele, který se pak deformuje vlivem tahových napětí od setrvačných sil. Dokud nedojde k přetržení průtlačku, lze určit místo dutiny podle zúžení průtlačku, jak je patrné z obr. 13.



Obr. 13 Centrální trhлина v průtlačku [6]

8 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

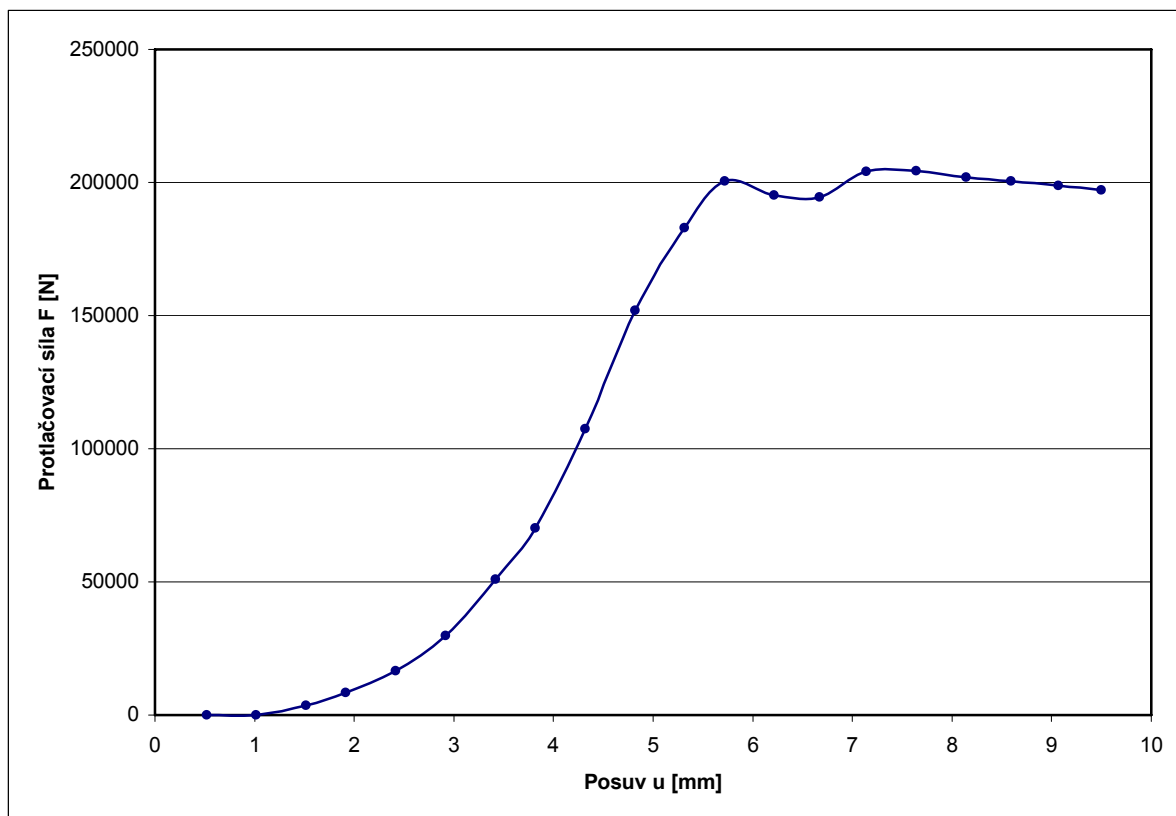
Byla provedena řada výpočtů pro geometrii z obr. 6. Pokud nebyl zvláštní důvod, vždy se měnil jen jeden z následujících parametrů: redukce průřezu, délka polotovaru, úhel redukčního kuželu, poloměry zaoblení přechodových částí mezi válcovou a kuželovou částí průtlačnice, materiál polotovaru a koeficient tření mezi polotovarem a průtlačnicí. Byl zkoumán vliv těchto parametrů na maximální protlačovací sílu, maximální kontaktní tlak p_{\max} , rovnoměrnost plastické deformace na základě ε_{rel} a maximální osově tahové napětí v průtlačku σ_y .

Výchozí parametry jsou:

- redukce z průměru 10,65 mm na 7,1 mm (redukce 56 %)
- délka průtlačku 20 mm
- úhel redukčního kuželu 20°
- poloměry zaoblení přechodových částí $R1 = R2 = 1,5$ mm
- materiál 2
- koeficient tření 0,085

8.1 PROTlačOVACÍ SÍLA

Průběh protlačovací síly získané MKP při protlačování pro výchozí parametry je na obr. 14.

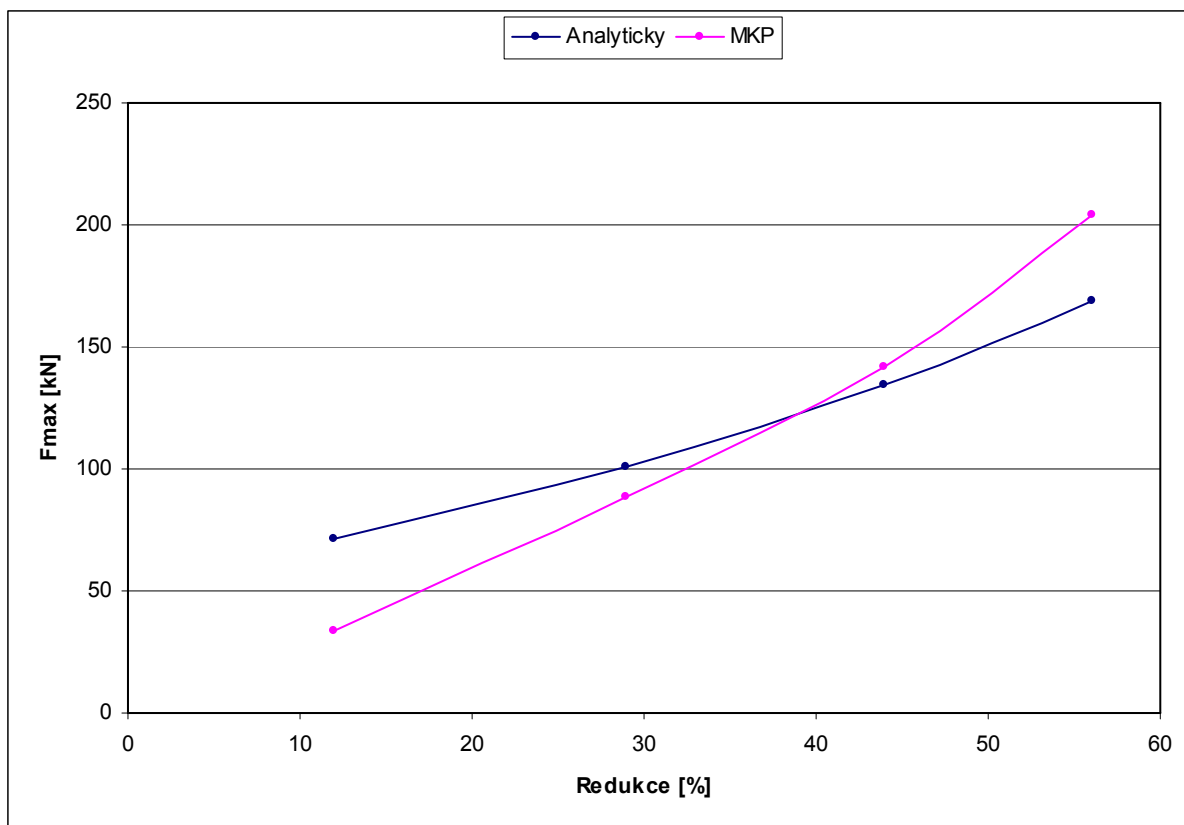


Obr. 14 Průběh protlačovací síly

Síla postupně narůstá z nuly až se ustálí na určité hodnotě, tuto ustálenou hodnotu nazýváme maximální silou. Obdobný průběh sil se získal i u ostatních řešených variant, zkoumajících vliv redukce, délky polotovaru, redukčního kuželu, zaoblení přechodových částí, materiálu polotovaru a koeficientu tření na protlačovací sílu. Maximální hodnoty se však liší. Ty jsou srovnány se silami vypočtenými z rovnice (5). Protože přetvárný odpor, pomocí kterého se určí protlačovací síla, je zde uveden jako funkce redukce, úhlu redukčního kuželu, délky polotovaru, tření mezi průtlačnicí a polotovarem i materiálu, lze takto získané výsledky využít pro srovnání s výsledky MKP.

8.1.1 VLIV REDUKCE

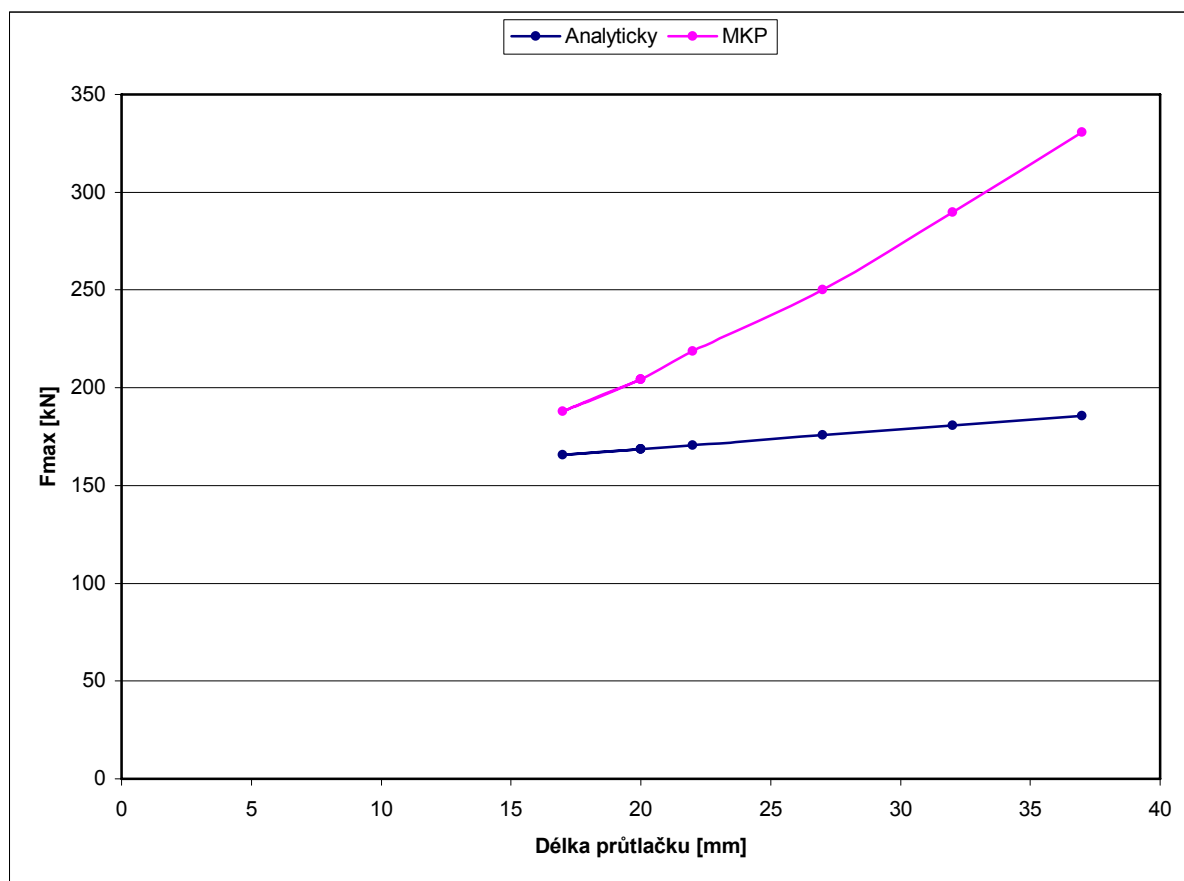
Byly provedeny výpočty pro čtyři různé redukce 12, 29, 44 a 56 procent, ostatní parametry jsou stejné jako výchozí. Z obr. 15 je zřejmé, že se zvětšující se redukcí, protlačovací síla roste, což potvrdil i teoretický výpočet.



Obr. 15 Maximální protlačovací síla v závislosti na redukci.

8.1.2 VLIV DÉLKY POLOTOVARU

Délka polotovaru byla měněna v rozmezí 17 – 40 mm. Protlačovací síla dle očekávání se zvětšující délkou polotovaru roste (obr. 16).

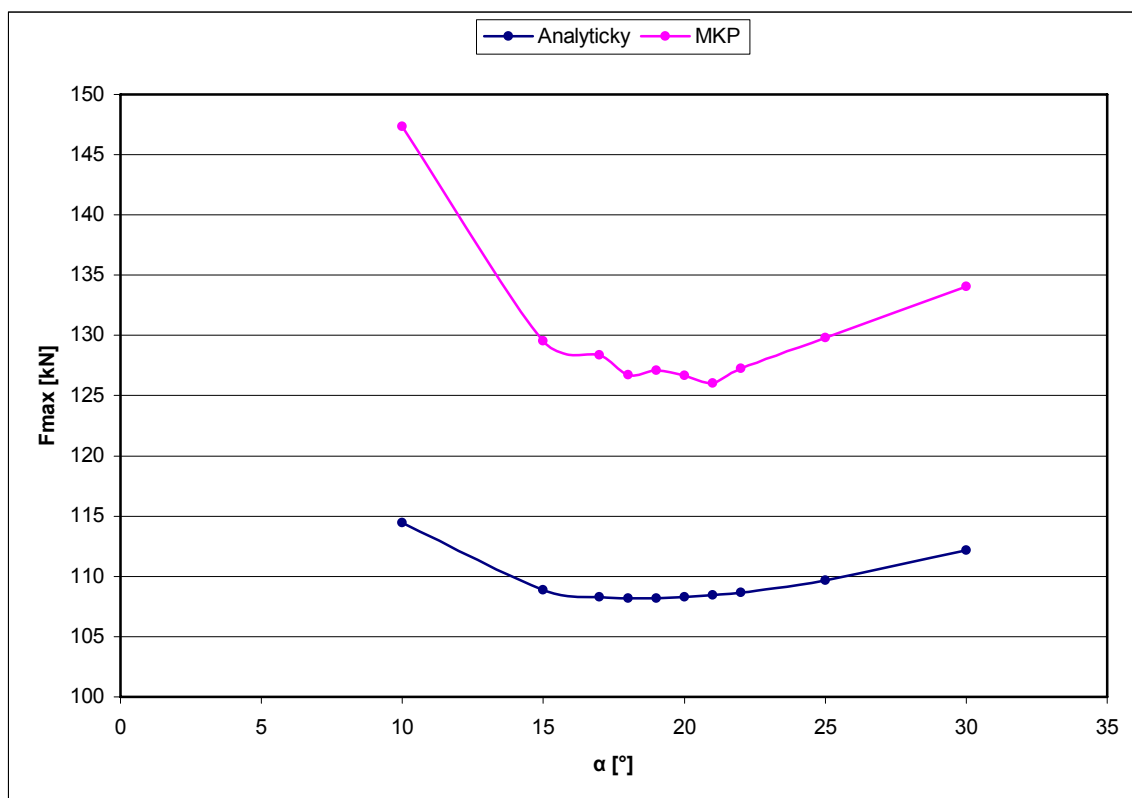


Obr. 16 Vliv délky polotovaru na protlačovací sílu

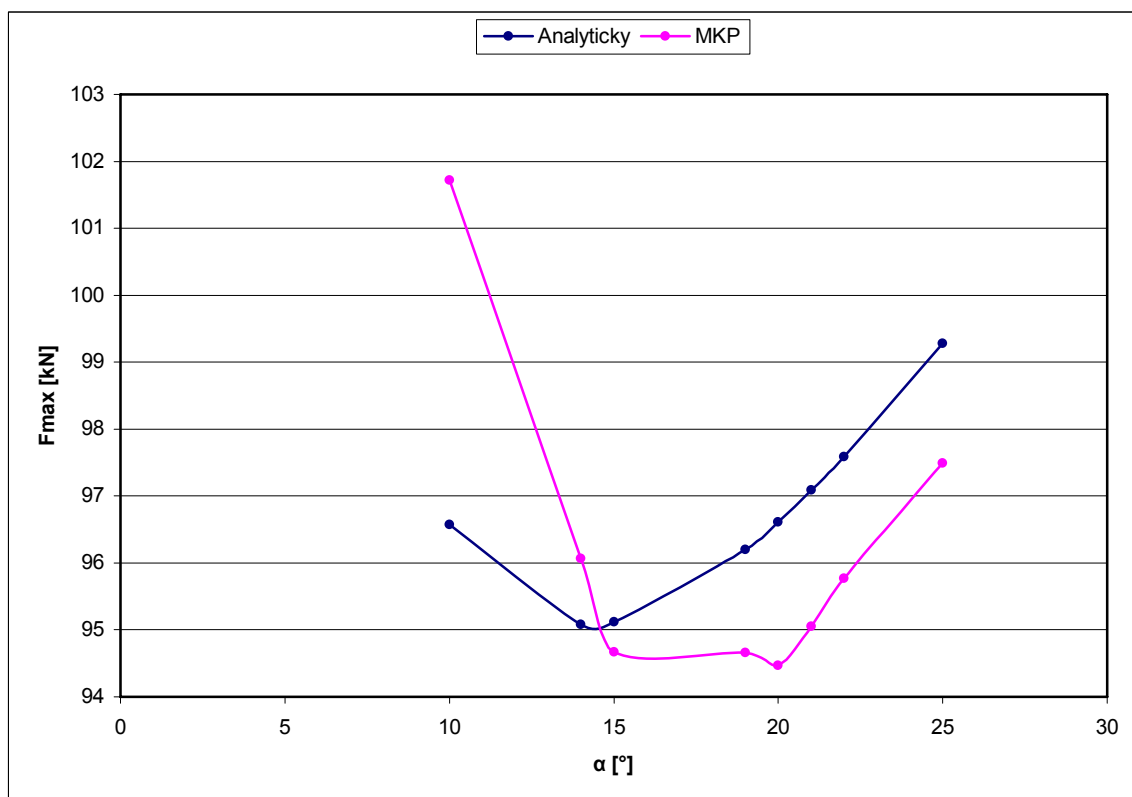
8.1.3 VLIV ÚHLU REDUKCE

Abychom určili optimální úhel redukce (úhel, při kterém je protlačovací síla nejmenší), byly z průběhů protlačovacích sil pro různé úhly redukce v rozmezí $10 - 30^\circ$ vybrány maximální hodnoty a ty pak vyneseny do grafu v závislosti na úhlu redukce. Protlačit materiál se při úhlech větších než 30° nepodařilo. Jelikož výpočtový vztah (2) vyjadřuje optimální úhel v závislosti na koeficientu tření, byly provedeny výpočty optimálního úhlu pro koeficient tření 0,085 viz obr. 17 a pro koeficient tření 0,05 viz obr. 18. Pro polotovar byl v těchto výpočtech použit materiál 1.

Se zvětšujícím se úhlem redukce maximální protlačovací síla klesá a následně zase narůstá. Absolutního minima dosáhly protlačovací síly pro výpočet varianty s koeficientem tření 0,085 pro úhel 21° a u varianty s koeficientem tření 0,05 to byl úhel 20° . Tyto hodnoty se přesně neshodují s optimálními úhly vypočtenými z rovnice (2) (viz tab. 3), nicméně z grafů na obr. 17 a 18 je patrné, že hodnoty minimálních protlačovacích sil v rozsahu $15 - 20^\circ$ se příliš neliší. Chceme-li snížit protlačovací síly, je vhodné volit úhel redukčního kuželu v tomto rozsahu.



Obr. 17 Vliv redukčního úhlu na maximální protlačovací sílu (koeficient tření 0,085)

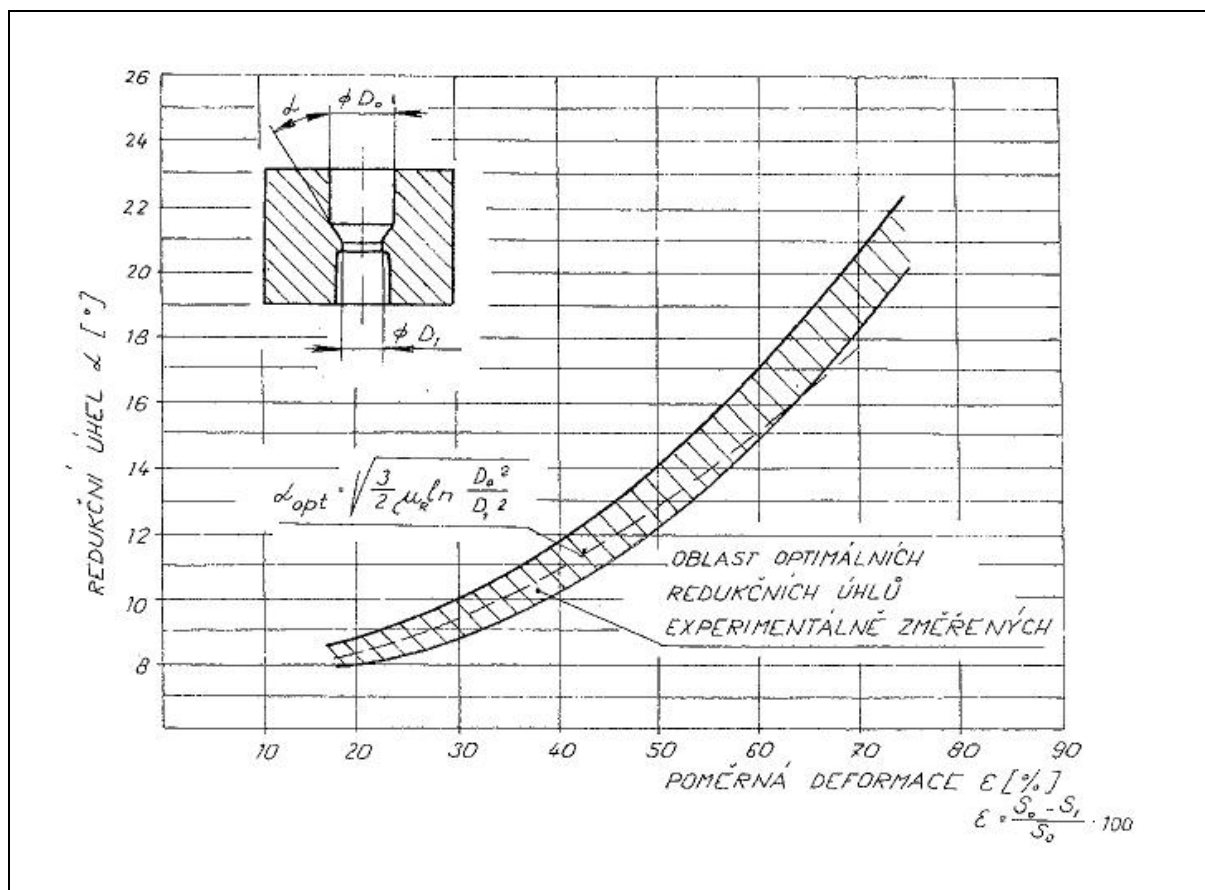


Obr. 18 Vliv redukčního úhlu na maximální protlačovací sílu (koeficient tření 0,05)

Tab. 3 Optimální úhel dle výpočtu a MKP

| Koeficient tření [-] | $\alpha_{\text{opt}} [^\circ]$ dle (2) | $\alpha_{\text{opt}} [^\circ]$ dle (5) | $\alpha_{\text{opt}} \text{ (MKP)} [^\circ]$ |
|----------------------|--|--|--|
| 0,085 | 18 | 17 – 21 | 21 |
| 0,05 | 14 | 14 – 15 | 20 |

Na obr. 19 převzatého z [2] je závislost úhlu redukčního kuželu na poměrné deformaci. Křivka pro optimální úhel je vypočtená z rovnice (2) pro koeficient tření 0,05. Mnou vypočtený optimální úhel pro koeficient tření 0,05 a redukci 56 % se od hodnoty 14 ° odpovídající této křivce liší, což může být zapříčiněno volbou odlišných ostatních procesních parametrů.



Obr. 19 Závislost úhlu redukčního kuželu na poměrné deformaci [2]

8.1.4 VLIV ZAOBLLENÍ PŘECHODOVÝCH ČÁSTÍ PRŮTLAČNICE

Poloměry zaoblení přechodových částí jsem volila v rozmezí 1,5 – 5 mm. Výsledky pro různé kombinace těchto poloměrů jsou shrnuty v tabulce 4. Rovnice (5) tyto parametry nezahrnuje. Z výsledků MKP vyplývá, že není vhodné volit poloměr R1 menší než poloměr R2. Nejmenší protlačovací síly bylo dosaženo pro kombinaci R1 = 5 mm a R2 = 1,5 mm nebo R2 = 3 mm.

Tab. 4 Vliv zaoblení přechodových částí průtláčnice na maximální protlačovací sílu

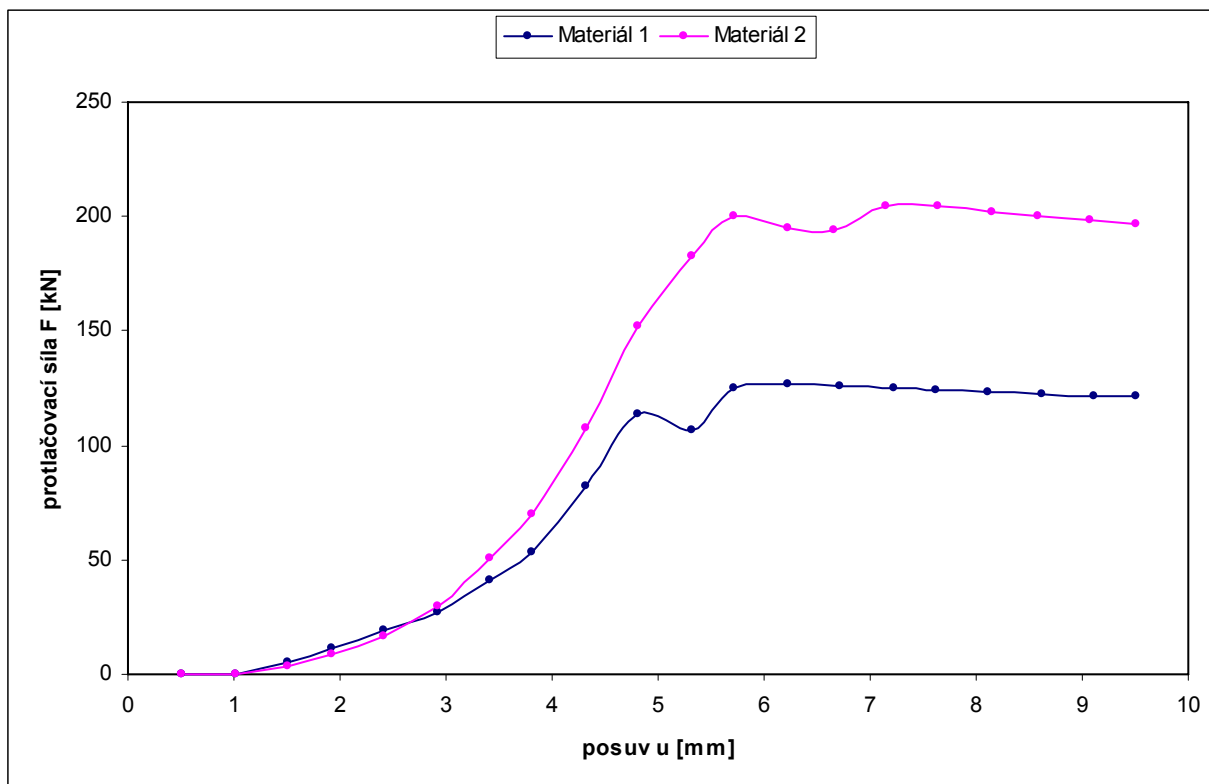
| R1 [mm] | R2 [mm] | F_{\max} (MKP) [kN] |
|---------|---------|-----------------------|
| 1,5 | 1,5 | 204 |
| 1,5 | 3 | 205 |
| 1,5 | 5 | 207 ** |
| 3 | 1,5 | 203 |
| 3 | 3 | 201 |
| 3 | 5 | 202 |
| 5 | 1,5 | 197 * |
| 5 | 3 | 197 * |
| 5 | 5 | 200 |

* Minimální hodnota

** Maximální hodnota

8.1.5 VLIV MATERIÁLU

Na obr. 20 je průběh protlačovací síly v závislosti na posuvu, výpočet byl proveden pro materiál 1 a 2. Hodnoty maximálních protlačovacích sil jsou uvedeny v tabulce 5, pro srovnání jsou zde uvedeny síly získané z rovnice (5). K protlačení materiálu s nižší mezí kluzu je potřeba menší protlačovací síly, což lze říci i na základě hodnot vypočtených analyticky.



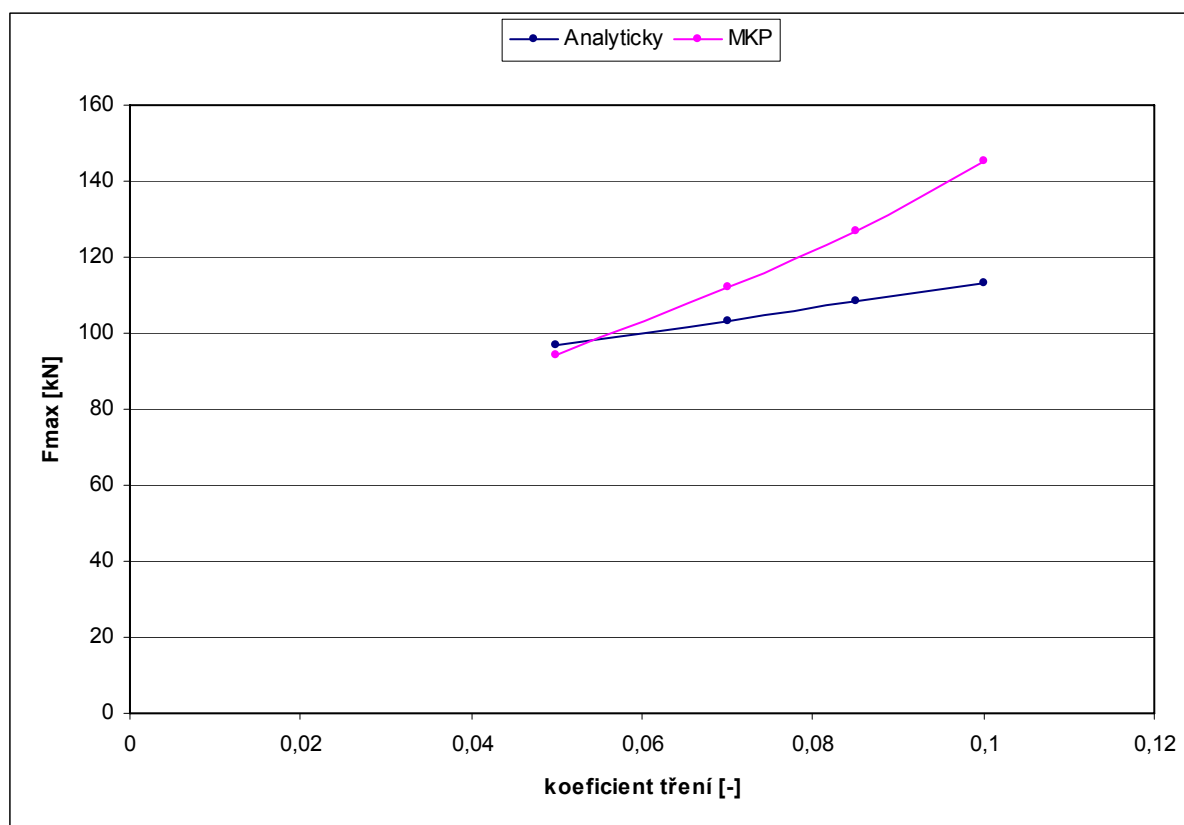
Obr. 20 Průběh protlačovací síly v závislosti na posuvu

Tab. 5 Vliv materiálu na maximální protlačovací sílu

| Materiál | $F_{\text{analytický}} [\text{kN}]$ | $F_{\text{max}} (\text{MKP}) [\text{kN}]$ |
|----------|-------------------------------------|---|
| 1 | 108 | 127 |
| 2 | 169 | 204 |

8.1.6 VLIV TŘENÍ

Koeficient tření byl volen v rozmezí 0,05 – 0,1. Z grafu na obr. 21 vyplývá, že se zvyšujícím se koeficientem tření protlačovací síla roste.

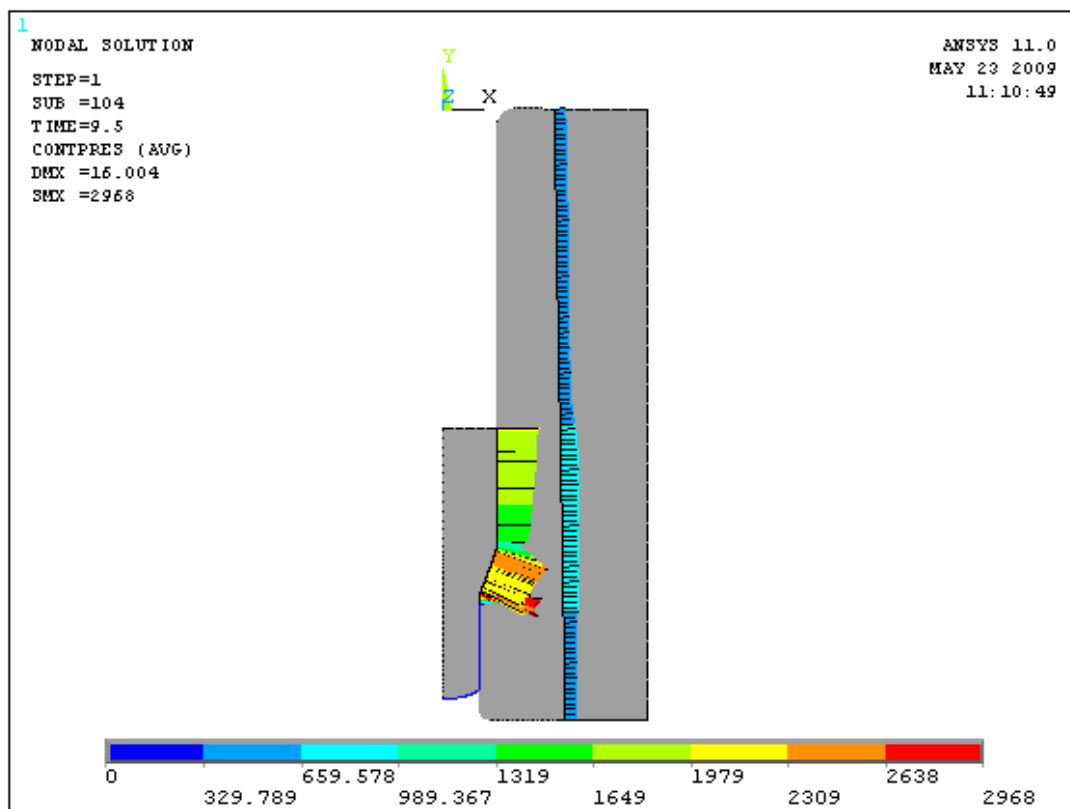


Obr. 21 Vliv koeficientu tření na maximální protlačovací sílu

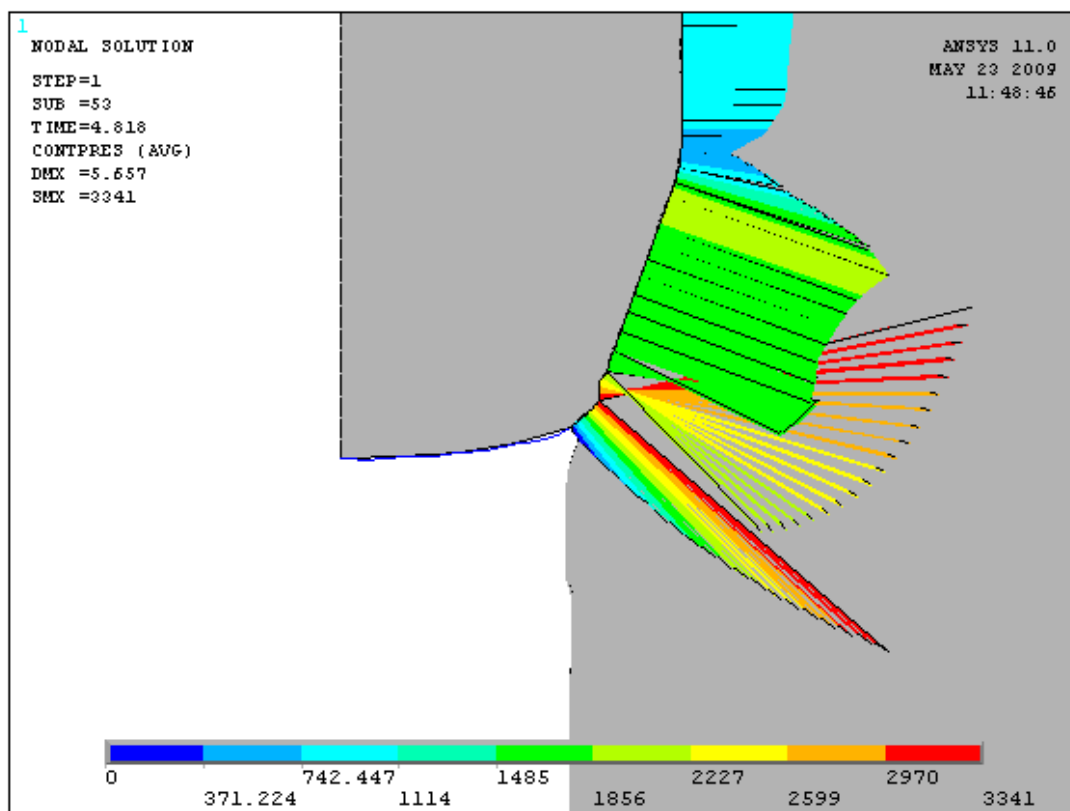
8.2 MAXIMÁLNÍ KONTAKTNÍ TLAK

Maximálních tlaků bylo pro různé parametry dosaženo v různých místech, ve většině případů to bylo při vstupu materiálu do místa s největší redukcí, někdy však místo s největším tlakem bylo při vstupu materiálu do redukční části průtlačnice a při větších délkách polotovarů se maximum objevilo u horní hrany průtlačku.

Na obr. 22 je průběh tlaku působícího na průtlačnici a objímku pro výchozí parametry. Největších hodnot dosahuje v redukční části průtlačnice, detail viz obr. 23. V tomto případě bylo maximálního tlaku dosaženo před vstupem materiálu do místa s největší redukcí.



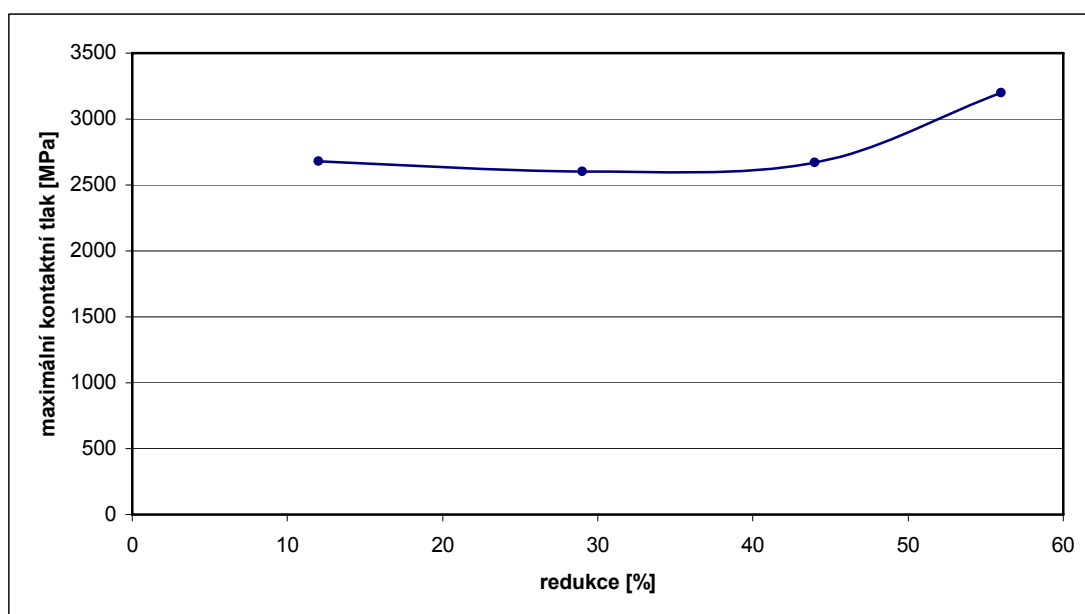
Obr. 22 Průběh kontaktního tlaku podél stěny průtlačnice



Obr. 23 Průběh kontaktního tlaku v redukční části průtlačnice

8.2.1 VLIV REDUKCE

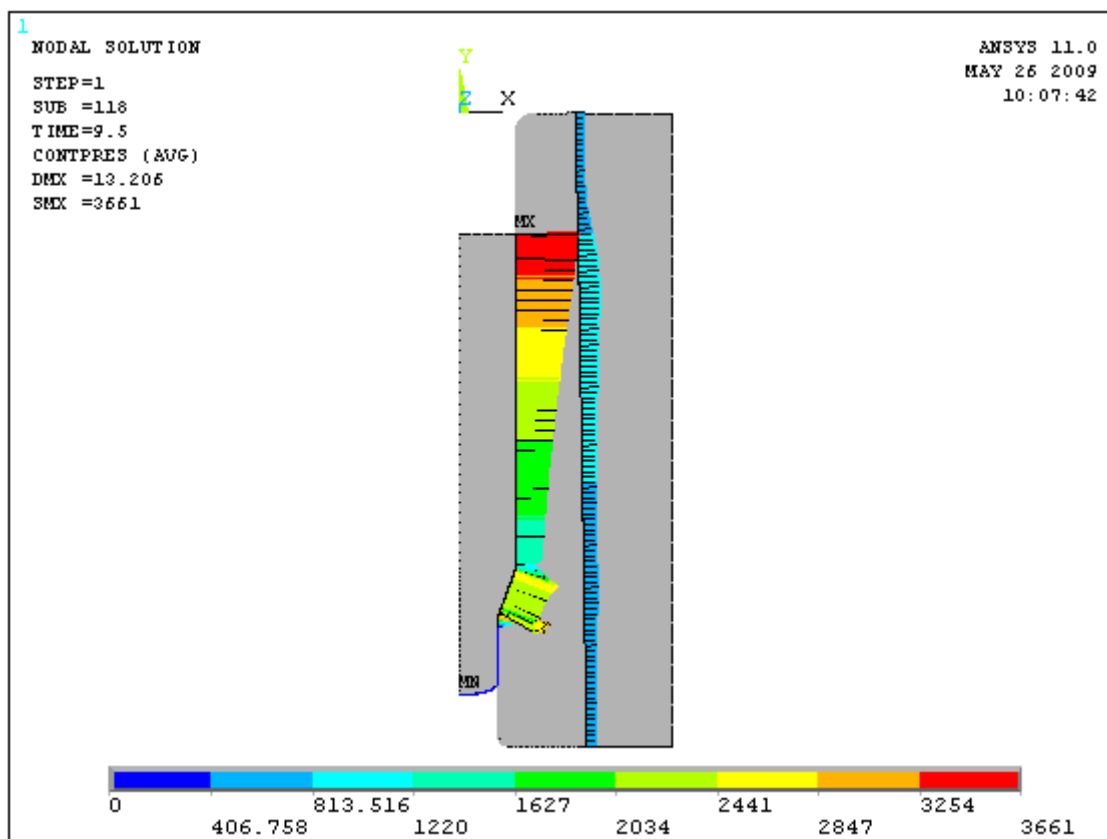
Při změně redukce byl maximální kontaktní tlak skoro stejný, avšak při redukci 56 % vzrostl. Při větších redukcích by tlak pravděpodobně narůstal dále, což ale nebylo z časových důvodů ověřeno.



Obr. 24 Vliv redukce na maximální kontaktní tlak

8.2.2 VLIV DÉLKY POLOTOVARU

Délka polotovaru byla měněna v rozsahu 17 – 40 mm. Při větších délkách polotovarů nebyl maximální kontaktní tlak v místě s největší redukcí, ale na horní hraně průtlačku viz obr. 25. Při protlačování těchto délek polotovarů by proto mohlo dojít mezi polotovarem a průtlačnicí k zadírání. V tabulce 6 je u délek s maximálním tlakem v tomto místě uvedeno maximum a za ním v závorce je maximální tlak v průběhu protlačování v místě s největší redukcí.

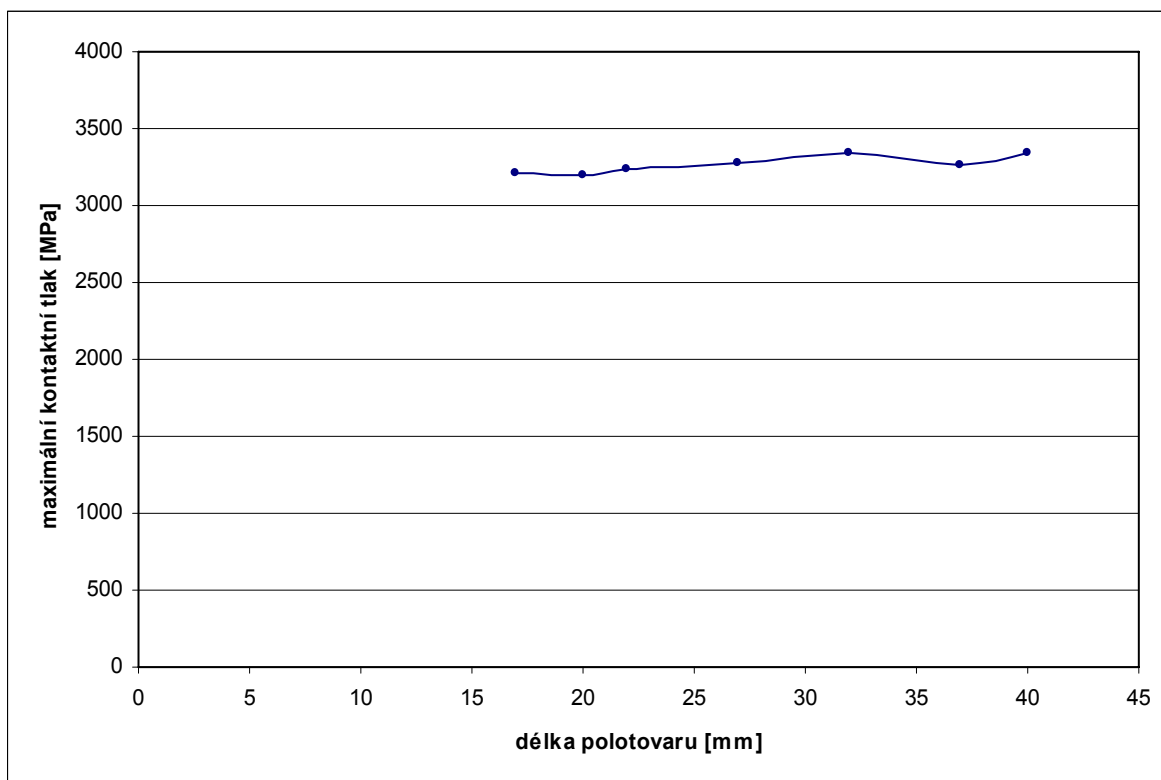


Obr. 25 Průběh kontaktního tlaku s maximem u horní hrany polotovaru

Tab. 6 Vliv délky polotovaru na maximální kontaktní tlak

| Délka polotovaru [mm] | Maximální kontaktní tlak [MPa] |
|-----------------------|--------------------------------|
| 40 | 3690 (3340) |
| 37 | 3490 (3260) |
| 32 | 3340 |
| 27 | 3270 |
| 22 | 3240 |
| 20 | 3200 |
| 17 | 3210 |

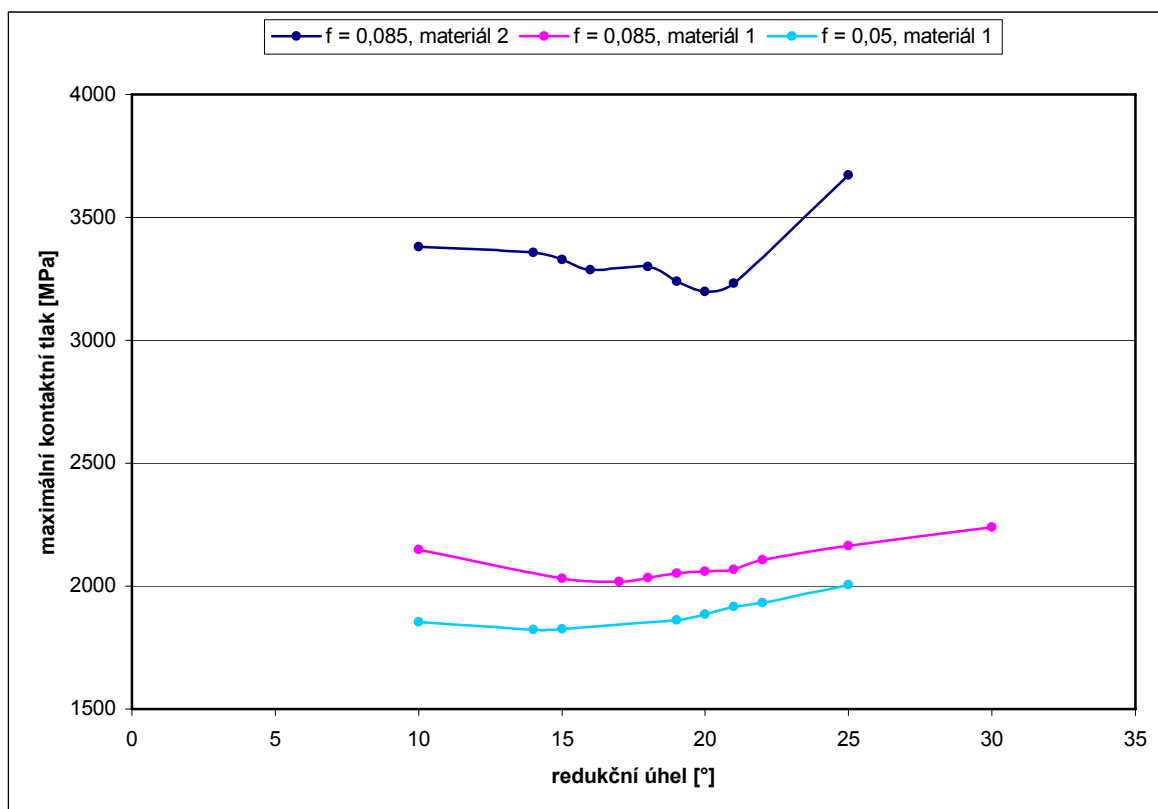
Vyneseme-li maximální hodnoty kontaktního tlaku v místě s největší redukcí průtlačnice v závislosti na délce průtlačku, dostáváme závislost, kde se zvětšující se délkou polotovaru maximální kontaktní tlak nepatrně narůstá (viz obr. 26).



Obr. 26 Vliv délky polotovaru na maximální kontaktní tlak

8.2.3 VLIV ÚHLU REDUKCE

Hodnoty redukčního úhlu jsou v rozmezí $10 - 30^\circ$. Po vytvoření grafu pro výchozí hodnoty s měnícím se úhlem, nebyl příliš zřejmý charakter průběhu maximálních kontaktních tlaků. Proto byl ještě přidán průběh maximálních kontaktních tlaků při změně koeficientu tření a druhu protlačovaného materiálu. Zdá se, že průběh tlaku má obdobný charakter jako protlačovací síly. Nejmenších hodnot dosahuje v rozmezí úhlů $15 - 20^\circ$ a v případech menších či větších hodnot redukčních úhlů maximální kontaktní tlak stoupá.



Obr. 27 Vliv redukčního úhlu na maximální protlačovací tlak

8.2.4 VLIV ZAOBLENÍ PŘECHODOVÝCH ČÁSTÍ PRŮTLAČNICE

Hodnoty maximálního kontaktního tlaku pro kombinaci poloměrů v rozmezí 1,5 – 5 mm jsou uvedeny v tabulce 7. Nejmenší hodnoty maximálního tlaku bylo dosaženo pro $R1 = 5 \text{ mm}$ a $R2 = 5 \text{ mm}$, největší hodnoty pro $R1 = 5 \text{ mm}$ a $R2 = 3 \text{ mm}$.

Tab. 7 Vliv zaoblení přechodových částí průtláčnice na maximální kontaktní tlak

| R1 [mm] | R2 [mm] | Maximální kontaktní tlak [MPa] |
|---------|---------|--------------------------------|
| 1,5 | 1,5 | 3340 |
| 1,5 | 3 | 3340 |
| 1,5 | 5 | 3360 |
| 3 | 1,5 | 3410 |
| 3 | 3 | 3420 |
| 3 | 5 | 3420 |
| 5 | 1,5 | 3470 |
| 5 | 3 | 3520** |
| 5 | 5 | 3330* |

* Minimální hodnota

** Maximální hodnota

8.2.5 VLIV MATERIÁLU

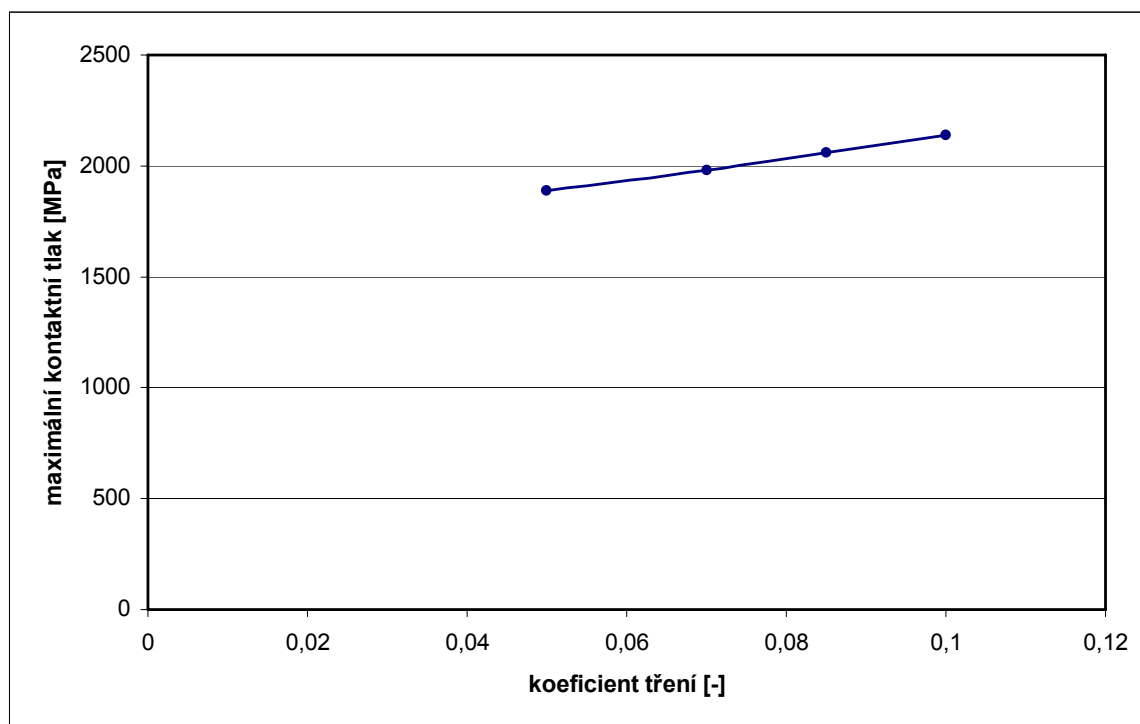
Pro materiály 1 a 2 jsou hodnoty maximálního kontaktního tlaku uvedeny v tabulce 8. Menší hodnoty kontaktního tlaku bylo dosaženo u materiálu 1 s nižší mezí kluzu.

Tab. 8 Vliv materiálu na maximální kontaktní tlak

| Materiál | Maximální kontaktní tlak [MPa] |
|----------|--------------------------------|
| 1 | 2060 |
| 2 | 3200 |

8.2.6 VLIV TŘENÍ

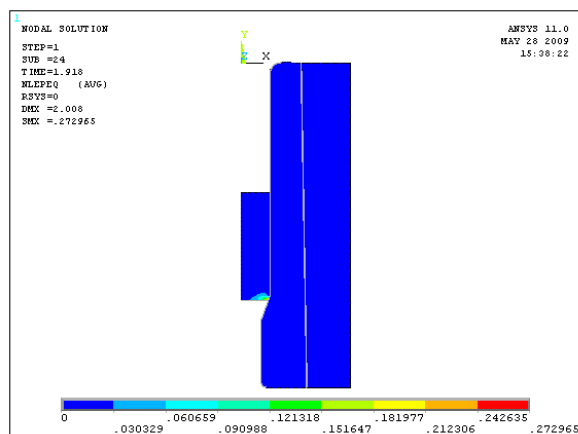
Vliv koeficientu tření v rozsahu 0,05 – 0,1 na maximální kontaktní tlak je na obr. 28. Se zvyšujícím se koeficientem tření maximální kontaktní tlak roste.



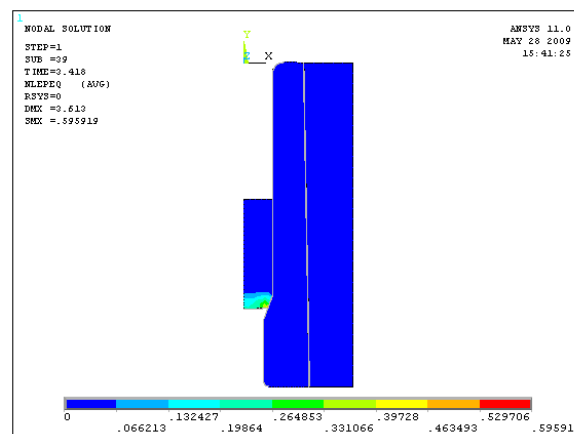
Obr. 28 Vliv koeficientu tření na maximální kontaktní tlak

8.3 NEHOMOGENITA PLASTICKÉ DEFORMACE

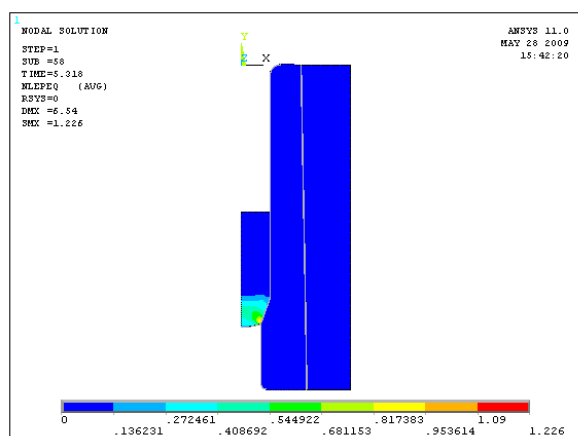
K plastické deformaci dochází v průtláčku při vstupu do redukční části průtláčnice, rozvoj oblasti plastické deformace pro výchozí parametry je na obr. 29 a – f.



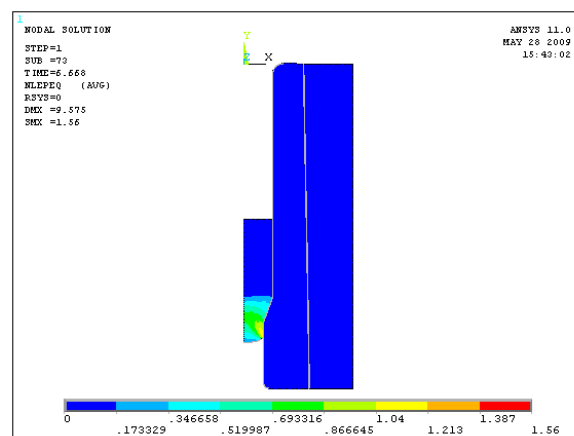
Obr. 29a



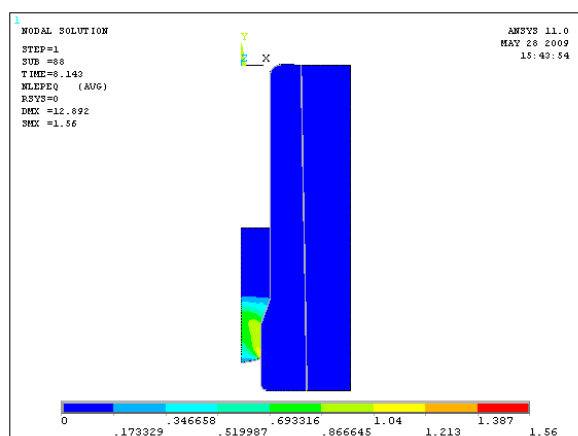
Obr. 29b



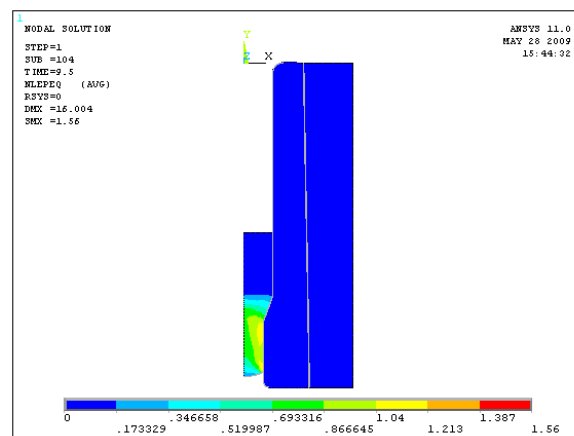
Obr. 29c



Obr. 29d



Obr. 29e

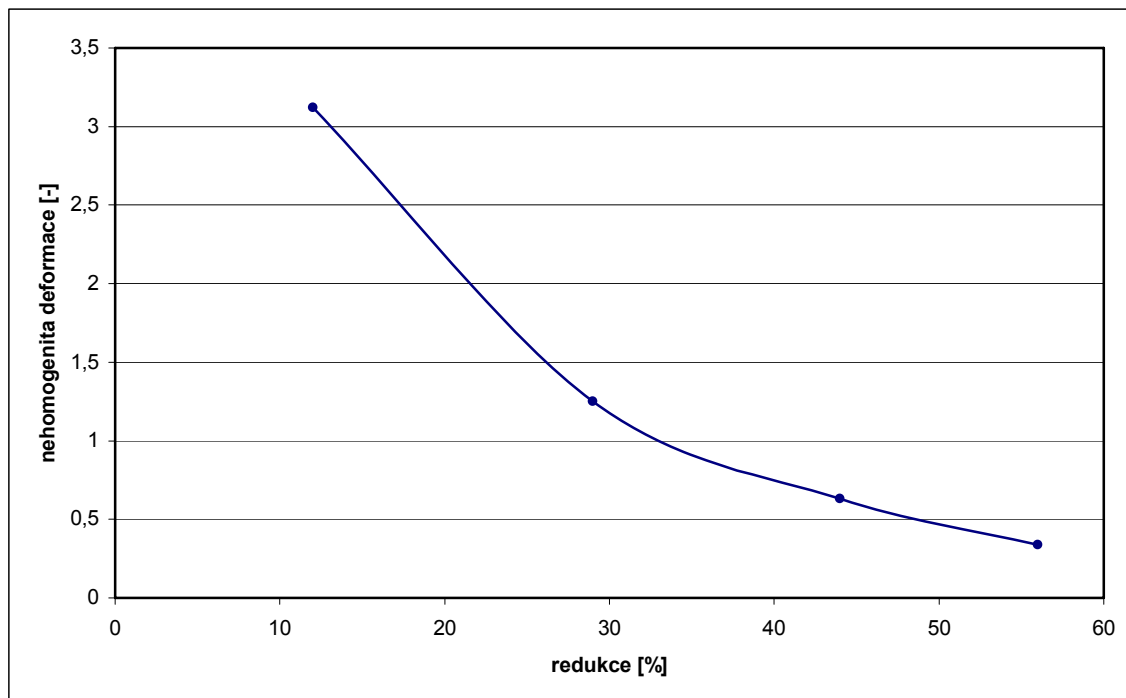


Obr. 29f

Obr. 29 a – f Rozvoj plastické deformace

8.3.1 VLIV REDUKCE

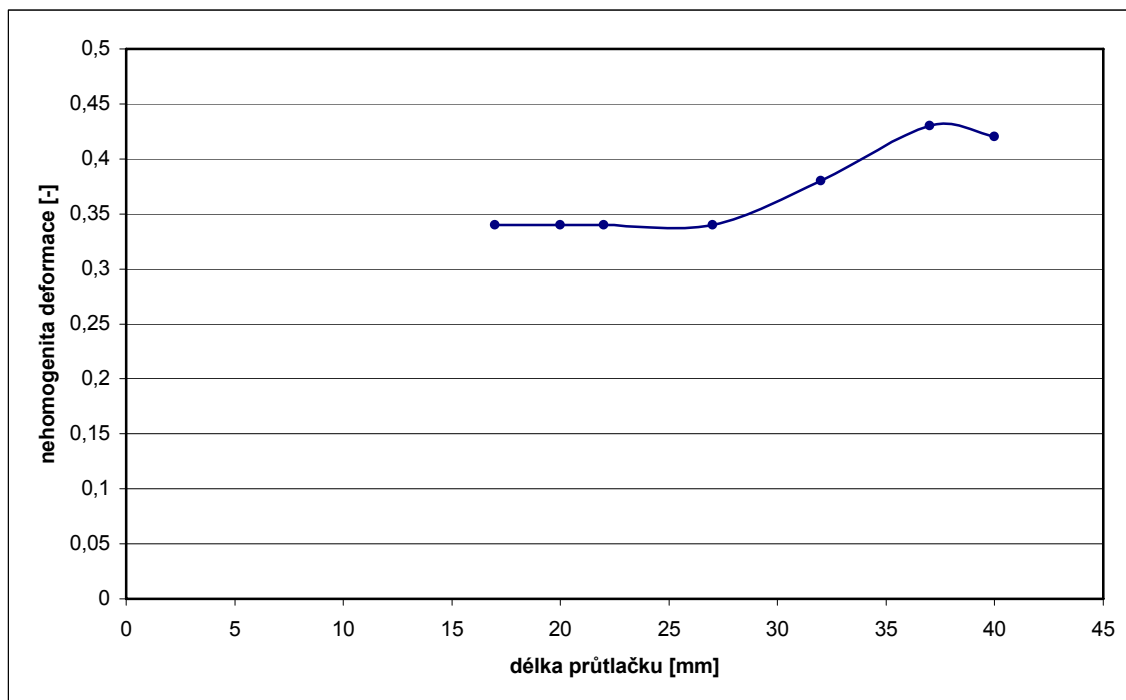
Vliv redukce v rozmezí 12 – 56 % na maximální kontaktní tlak je na obr. 30. Nehomogenita plastické deformace s rostoucí redukcí významně klesá.



Obr. 30 Vliv redukce na nehomogenitu plastické deformace

8.3.2 VLIV DÉLKY POLOTOVARU

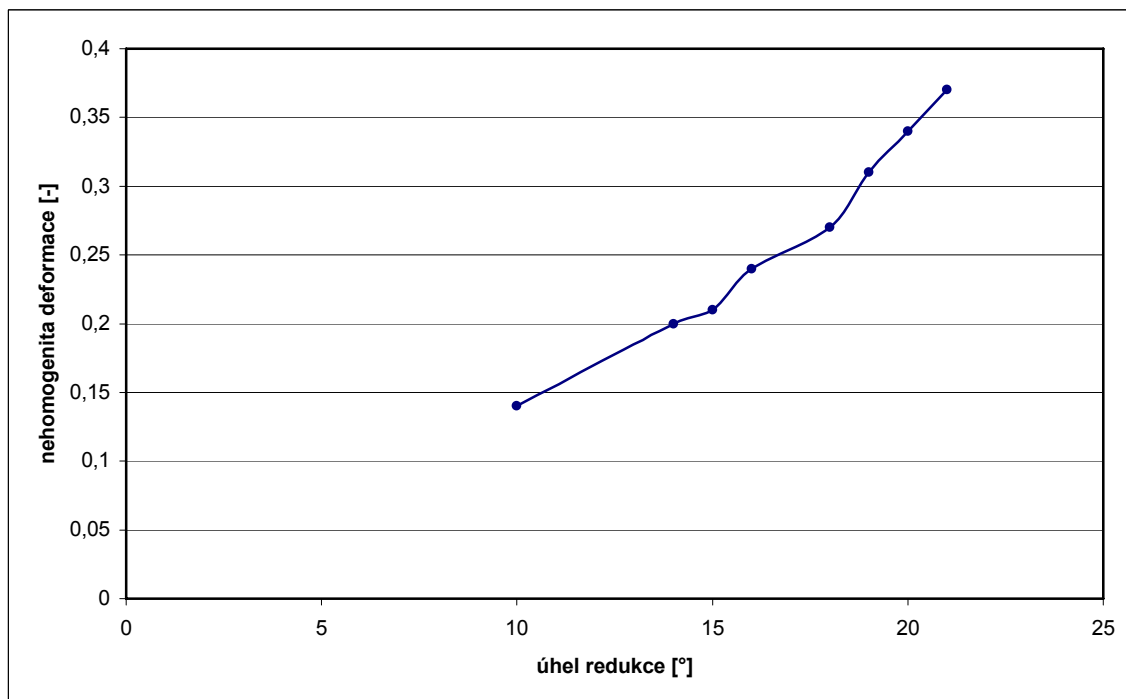
Délka polotovaru byla měněna v rozsahu 17 – 40 mm. Ze závislosti na obr. 31 vyplývá, že délka průtlačku nemá do určité hodnoty na nehomogenitu plastické deformace vliv, jedná se o délky polotovarů do 27 mm. Je-li délka polotovaru větší, nehomogenita plastické deformace má vzrůstající charakter.



Obr. 31 Vliv délky průtlačku na nehomogenitu plastické deformace

8.3.3 VLIV ÚHLU REDUKCE

Se zvětšujícím se úhlem redukce, nehomogenita plastické deformace roste. Tato závislost byla získána pro úhly redukce v rozsahu 10 – 21 ° (obr. 32).



Obr. 32 Vliv úhlu redukce na nehomogenitu plastické deformace

8.3.4 VLIV ZAOBLENÍ PŘECHODOVÝCH ČÁSTÍ PRŮTLAČNICE

Hodnoty nemohogenity plastické deformace pro kombinaci poloměrů zaoblení v rozmezí 1,5 – 5 mm jsou uvedeny v tabulce 9. Nejmenší hodnoty bylo dosaženo pro poloměry $R1 = R2 = 5$ mm a maximální hodnoty byly u poloměrů $R1 = R2 = 1,5$ mm. Čím větší jsou poloměry zaoblení přechodových částí průtláčnice, tím se nehomogenita plastické deformace snižuje.

Tab. 9 Vliv zaoblení přechodových částí průtláčnice na nehomogenitu plastické deformace

| R1 [mm] | R2 [mm] | Nehomogenita plastické deformace [-] |
|---------|---------|--------------------------------------|
| 1,5 | 1,5 | 0,34** |
| 1,5 | 3 | 0,32 |
| 1,5 | 5 | 0,29 |
| 3 | 1,5 | 0,32 |
| 3 | 3 | 0,30 |
| 3 | 5 | 0,30 |
| 5 | 1,5 | 0,31 |
| 5 | 3 | 0,29 |
| 5 | 5 | 0,26* |

* Minimální hodnota

** Maximální hodnota

8.3.5 VLIV MATERIÁLU

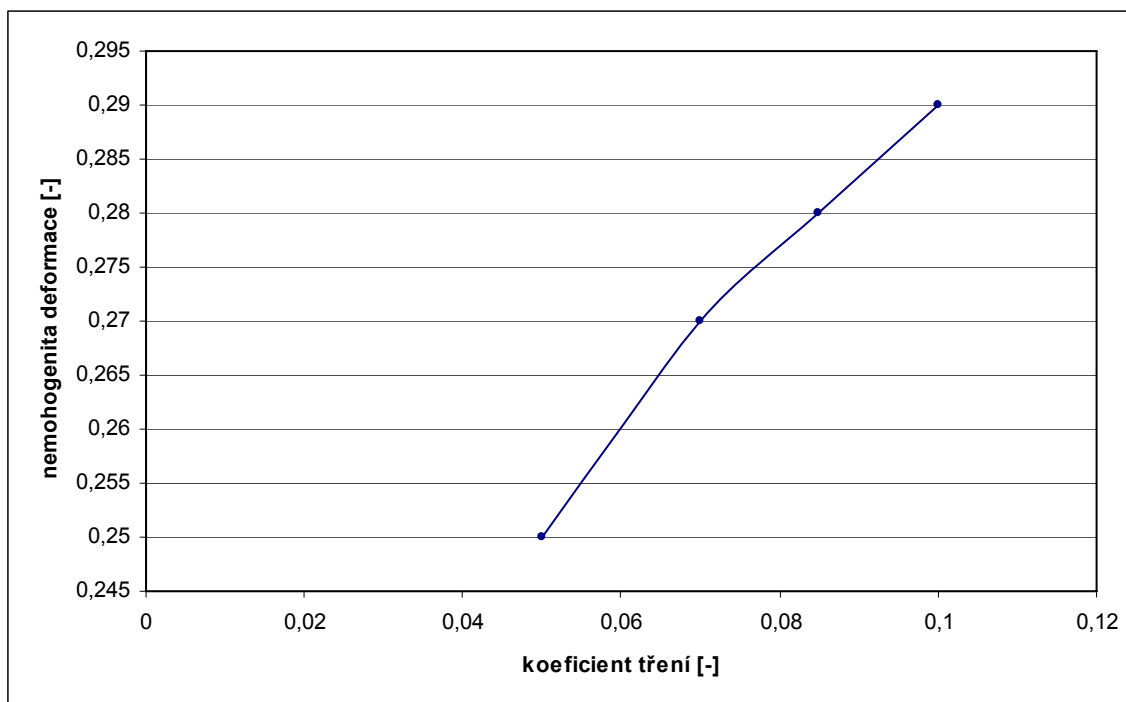
U materiálu 1 s mezí kluzu 186 MPa byla nehomogenita plastické deformace menší než u materiálu 2 s mezí kluzu 350 MPa (tabulka 10).

Tab. 10 Vliv materiálu polotovaru na nehomogenitu plastické deformace

| Materiál | Nehomogenita plastické deformace [-] |
|----------|--------------------------------------|
| 1 | 0,28 |
| 2 | 0,34 |

8.3.6 VLIV TŘENÍ

Protože pro materiál 2 se nepodařilo polotovar protlačit u koeficientu 0,1, byly použity výsledky protlačování materiálu 1 s koeficienty tření 0,05 – 0,1. Se zvětšujícím se koeficientem tření nehomogenita plastické deformace roste (obr. 33).

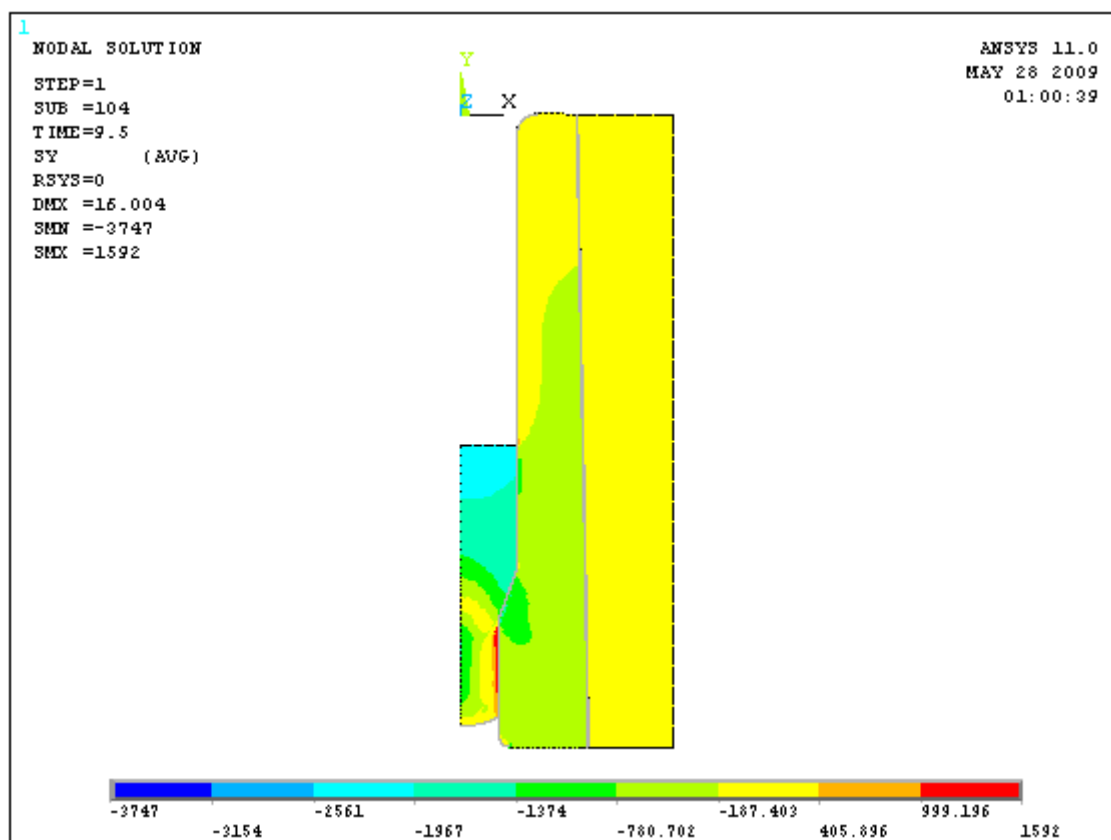


Obr. 33 Vliv koeficientu tření na nehomogenitu plastické deformace

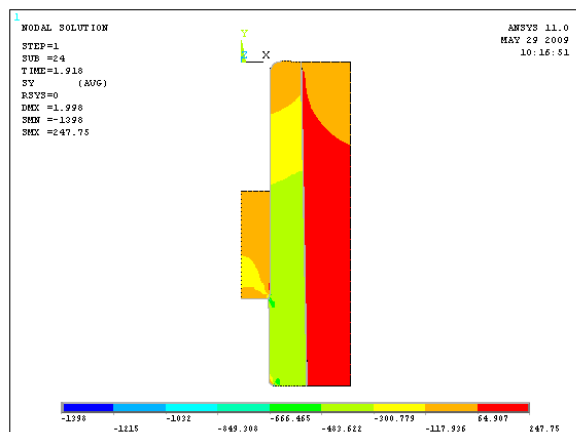
8.4 OSOVÉ NAPĚTÍ

Na obr. 34 jsou osová napětí po protlačování vzorku z průměru 10,65 mm na 7,1 mm (redukce 56 %), zde tahová napětí na ose průtlačku nevznikají. Avšak už při redukci z průměru 10,65 mm na 8 mm (redukce 44 %) oblast tahových napětí před vstupem do redukční části vzniká. Tato oblast je dobře viditelná např. při redukci 12 % viz obr. 35f, její vznik v průběhu zatěžování je na obr 35 a - f.

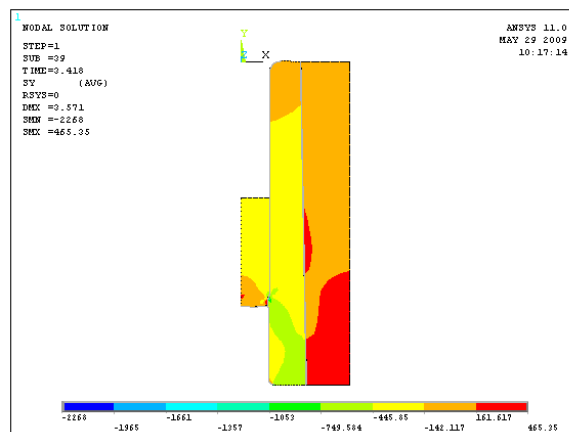
Byly provedeny simulace protlačování s měnícími se parametry (redukce, úhel redukčního kuželu, délka průtlačku, zaoblení přechodových částí, materiál polotovaru, koeficient tření). Tahová oblast na ose průtlačku vzniká jen při některých kombinacích těchto parametrů. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 11, kde je v případě vzniku tahového osového napětí uvedena i jeho maximální hodnota.



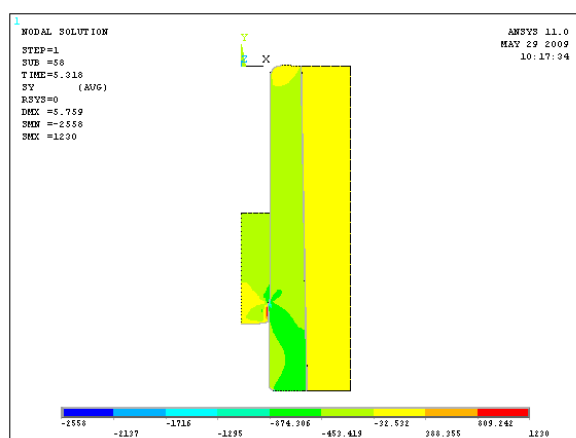
Obr. 34 Osové napětí při redukci 56 %



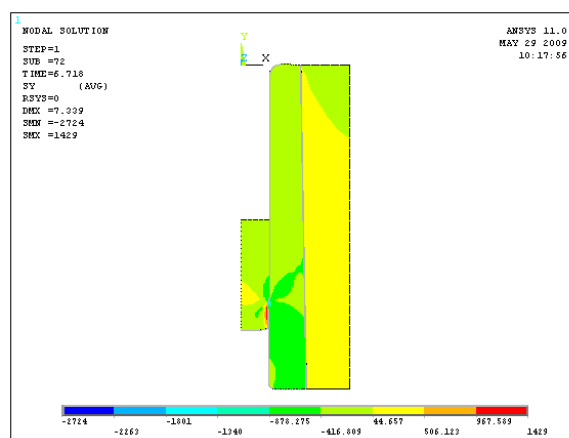
Obr. 35a



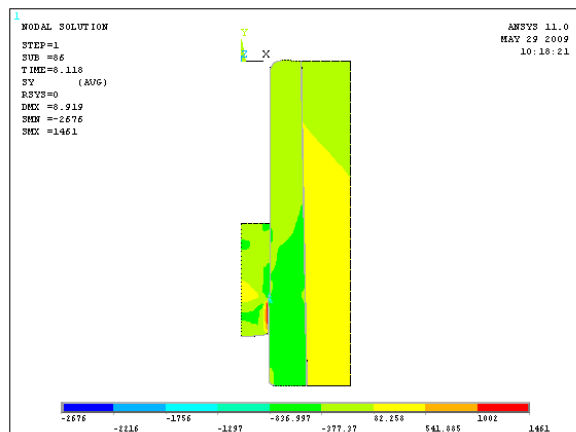
Obr. 35b



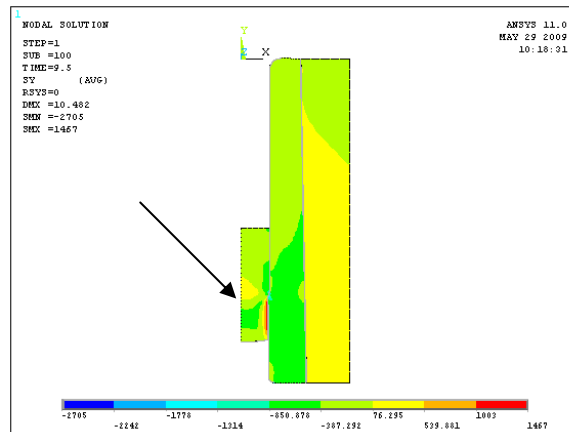
Obr. 35c



Obr. 35d



Obr. 35e



Obr. 35f

Obr. 35 a – f Vznik tahových osových napětí na ose průtláčku v průběhu zatěžování

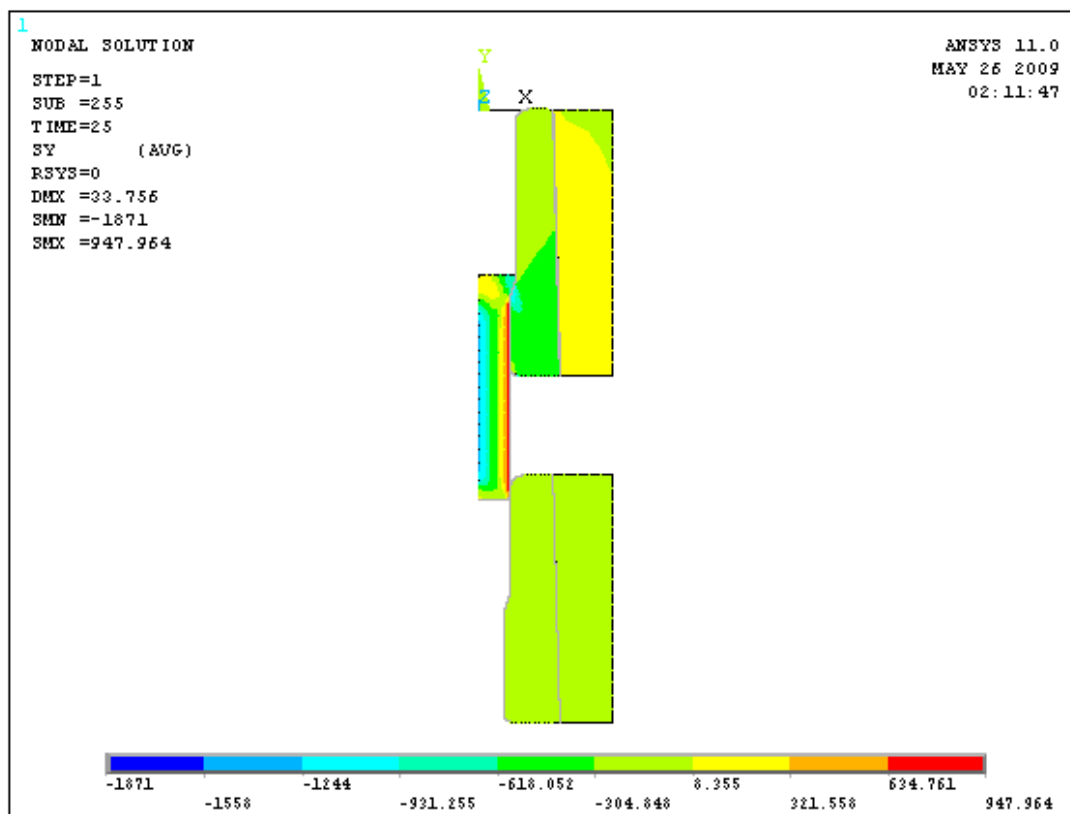
Tab. 11 Osová napětí vznikající v průtlačku

| Redukce [%] | Úhel redukce [°] | Koeficient tření [-] | Materiál | Osově napětí [MPa] |
|-------------|------------------|----------------------|----------|--------------------|
| 12 | 20 | 0,085 | 2 | 296 |
| 20 | 20 | 0,085 | 2 | 328 |
| 29 | 20 | 0,085 | 2 | 312 |
| 36 | 20 | 0,085 | 2 | 195 |
| 44 | 20 | 0,085 | 2 | 102 |
| 56 | 10 | 0,085 | 2 | 56 |
| 56 | 14 | 0,085 | 2 | 2 |
| 56 | 10 | 0,085 | 1 | 49 |
| 56 | 25 | 0,085 | 1 | 49 |
| 56 | 30 | 0,085 | 1 | 112 |
| 56 | 10 | 0,05 | 1 | 138 |
| 56 | 14 | 0,05 | 1 | 58 |
| 56 | 15 | 0,05 | 1 | 42 |
| 56 | 19 | 0,05 | 1 | 27 |
| 56 | 20 | 0,05 | 1 | 47 |
| 56 | 21 | 0,05 | 1 | 53 |
| 56 | 22 | 0,05 | 1 | 66 |
| 56 | 25 | 0,05 | 1 | 122 |

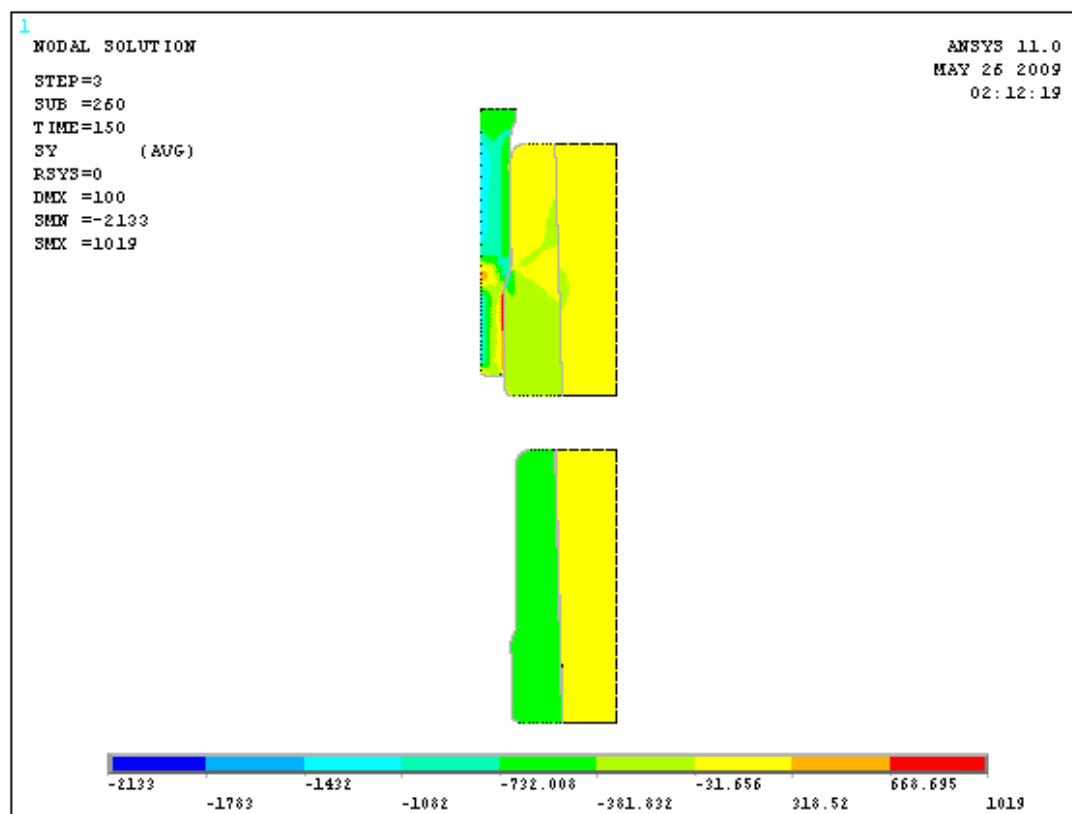
Pro redukci průřezu menší než 44 % vznikají na ose průtlačku tahová napětí, čím je redukce menší, tím je hodnota tahových osových napětí větší. Změna úhlu redukce vznik tahových napětí také ovlivňuje, k jejich vzniku dochází, je-li úhel redukce menší než 15°. Zaoblení přechodových částí průtlačnice a délka průtlačku nemají na vznik tahových osových napětí vliv.

8.5 VLIV ROZDĚLENÍ REDUKCE DO DVOU KROKŮ

Rozdělení redukce mělo významný vliv na vznik osových napětí v průtláčku. Zatímco při protlačování v jednom kroku osová napětí nevznikají, při rozdělení redukce do dvou kroků tahová napětí vznikají už po prvním kroku (obr. 36). Po protlačení ve druhém kroku jsou tato napětí ještě výraznější (obr. 37).



Obr. 36 Osová napětí po 1. kroku protlačování



Obr. 37 Osově napětí po 2. kroku protlačování

Velikosti tahových napětí pro všechny tři řešené varianty v obou krocích jsou uvedeny v tabulce 12. Největší tahová napětí vznikají při minimální redukci ve druhém kroku.

Tab. 12 Tahová napětí vznikající v průtlaku při rozdělení redukce do dvou kroků

| Redukce v 1. kroku | Redukce ve 2. kroku | SY po 1. kroku [MPa] | SY po 2. kroku [MPa] |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 49 (Ø10,65-9) | 13 (Ø9-7,1) | 282 | 571 |
| 42 (Ø10,65-8,1) | 23 (Ø8,1-7,1) | 115 | 872 |
| 29 (Ø10,65-7,6) | 38 (Ø7,6-7,1) | 58 | 1132 |

Velikost nehomogenity plastické deformace po druhém protlačení je uvedena tabulce 13. Její minimální hodnoty 1,11 bylo dosaženo u varianty 3. Oproti hodnotě 0,34 dosažené při protlačení v jednom kroku je to hodnota téměř trojnásobná.

Tab. 13 Nehomogenita plastické deformace při rozdělení redukce do dvou kroků

| Varianta rozdělení redukce | Nehomogenita plastické deformace [-] |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 3,56 |
| 2 | 2,05 |
| 3 | 1,11 |

8.6 VLIV HUSTOTY SÍTĚ

Přesnost výsledků závisí na velikosti použitých prvků. Čím menší jsou prvky sítě, tím přesnější jsou výpočty. Ve všech výpočtech byla použita stejná velikost prvků. Velikost prvků objímky byla 2 mm, velikost prvků průtlačnice byla 0,5 mm a v místě redukce 0,25 mm. Velikost prvků na svislé hraně průtlačku byla 0,25 mm, na vodorovné hraně byl zadán počet prvků 5, tzn. různě velké prvky pro jiné stupně redukce, pro redukci z 10,65 mm na 7,1 mm je velikost prvku 1,065 mm. Oproti velikosti prvků průtlačku, je síť průtlačnice jemnější. Pro stanovení vlivu hustoty sítě jsem proto zmenšovala jen prvky průtlačku. V tabulce 14 uvádím vliv velikosti prvků průtlačku na vodorovné a svislé hraně na kontaktní tlak a maximální protlačovací sílu.

Tab. 14 Vliv velikosti prvků

| Velikost prvku na vodorovné hraně průtlačku [mm] | Velikost prvku na svislé hraně průtlačku [mm] | Nehomogenita plastické deformace [-] | Kontaktní tlak [MPa] | Maximální protlačovací síla [kN] |
|--|---|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1,065 | 0,25 | 0,29 | 2060 | 127 |
| 0,533 | 0,25 | 0,34 | 2090 | 133 |
| 0,355 | 0,25 | 0,35 | 2160 | 128 |
| 0,296 | 0,2 | 0,34 | 2400 | 129 |
| 0,266 | 0,15 | 0,35 | 2350 | 129 |

Velikost nehomogenity plastické deformace, kontaktního tlaku a maximální protlačovací síly zpočátku roste se zmenšujícími se velikostmi prvků. Pro nejjemnější testované síť však je patrné ustálení vyšetřovaných hodnot. Odchylka oproti nejhrubší síti je v případě protlačovací síly v jednotkách procent, u kontaktního tlaku do 15 % a pouze u plastické deformace jako významně lokální veličiny je hranice 15 % překročena. Ke vzniku tahových osových napětí v průtlačku nedošlo. Z časových důvodů byly všechny varianty realizovány na síti dle prvního řádku tabulky, tedy jako nejhrubší. Protože však posuzujeme navzájem jednotlivé varianty mezi sebou, je možno považovat vypovídající hodnotu takových srovnání za uspokojivou.

9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovit závislost mezi mechanickým namáháním kritických částí pracovního povrchu průtlačnice a geometrickými a materiálovými charakteristikami procesu protlačování. Simulace výpočtového modelování procesu dopředného protlačování za studena byla provedena v programu ANSYS 11.0. Byl zkoumán vliv redukce, redukčního kuželu, délky průtlačku, zaoblení přechodových částí průtlačnice, materiálu polotovaru a tření mezi nástrojem a polotovarem na maximální protlačovací sílu, maximální kontaktní tlak, nehomogenitu plastické deformace a tahová napětí vznikající na ose průtlačku.

Vyhodnocení výsledků proběhlo ze dvou hledisek – namáhání průtlačnice a kvalita průtlačku. Namáhání průtlačnice ovlivňuje kontaktní tlak, nehomogenita plastické deformace má vliv na vznik tahových napětí na ose průtlačku, která mohou způsobit vznik centrálních trhlin a výrobek tak znehodnotit.

Výsledky lze shrnout takto:

- čím je větší redukce, tím je potřebná větší protlačovací síla a na průtlačnici působí větší kontaktní tlak, nehomogenita plastické deformace klesá a zvětšují se tahová napětí
- redukční úhel je z hlediska minimalizace protlačovacích sil a kontaktního tlaku vhodné volit v rozmezí $15 - 20^\circ$, nehomogenita plastické deformace však se vzrůstajícím úhlem stoupá a je-li úhel volen mimo toto rozmezí, mohou vznikat na ose průtlačku tahová napětí
- délka průtlačku s jeho rostoucí délkou negativně ovlivňuje protlačovací sílu, kontaktní tlak a při větších délkách i nehomogenitu plastické deformace, vznik tahových napětí se při redukčním úhlu 20° se neobjevil
- zaoblení R1 a R2 přechodových částí průtlačnice je vhodné volit s ohledem na maximální protlačovací sílu, maximální kontaktní tlak a nehomogenitu plastické deformace co největší, případně R1 volit větší než R2, vznik tahových napětí tento parametr neovlivnil
- se vzrůstající mezí kluzu materiálu je třeba větší protlačovací síly, průtlačnice je více namáhána kontaktním tlakem a zvětšuje se nehomogenita plastické deformace, druh protlačovaného materiálu nemá vliv na vznik tahových napětí
- snižuje-li se koeficient tření, klesá protlačovací síla, kontaktní tlak i nehomogenita plastické deformace, dochází však ke vzniku větších tahových napětí

Jednoznačný je pouze vliv délky průtlačku, zaoblení přechodových částí průtlačnice a materiálu použitého k protlačování. Redukce, redukční úhel a koeficient tření mají protichůdný vliv z hlediska namáhání průtlačnice a kvality průtlačku. Proto je obtížné zvolit optimální hodnoty těchto parametrů. Rozdělení redukce do dvou kroků nedoporučuji z důvodu vzniku velkých tahových napětí na ose průtlačku.

10 LITERATURA

- [1] Janíček, P., Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky – hledání souvislostí, Brno, CERM, VUTIUM, 2007
- [2] Leimberger, J. a kol., Směrnice pro konstrukci a výpočet funkčních částí tvářecích nástrojů pro víceoperační objemové tváření za studena a poloohřevu, Brno 1976
- [3] Feldman, H. D., Protlačování oceli, Praha, SNTL, 1962
- [4] Forejt, M., Příspěvek k návrhu složených průtlačnic pro objemové tváření za studena, Brno, 1976
- [5] Carbol, J. a kol., Vývoj technologie výroby nové generace střižných, řezných a lisovacích nástrojů pro oceli s vysokými zpevňovacími charakteristikami, Dobrá 2006
- [6] Zanerni, M. N., Stav napjatosti v zápustkách při dopředném protlačování s ohledem na kvalitu výrobků a součinitel tření, Brno, 1972
- [7] Farlík, A. a Ondráček, E., Teorie dynamického tváření, Praha, SNTL, 1968